



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

**DIAGNOSTIKA PLAZMATU VYPÍNACÍHO POCHODU ZA  
POMOCI DVOU VYSOKORYCHLOSTNÍCH KAMER**

SWITCHING ARC PLASMA DIAGNOSTICS BY USAGE OF TWO HIGH-SPEED CAMERAS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Martin Buchta**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Jiří Valenta, Ph.D.**

**BRNO 2018**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Martin Buchta

**ID:** 173623

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2017/18

## NÁZEV TÉMATU:

### **Diagnostika plazmatu vypínacího pochodu za pomoci dvou vysokorychlostních kamer**

## POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište zhášecí proces ve spínacích přístrojích.
2. Popište vysokorychlostní kamery používané v laboratoři spínacích přístrojů centra CVVOZE z hlediska diagnostiky oblouku.
3. Navrhněte experimentální model pro optickou diagnostiku oblouku založenou na dvou vysokorychlostních kamerách a proveďte na něm všechny potřebné experimenty.
4. Získané výsledky vyhodnoťte a analyzujte.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 1985

[2] FENDRYCH, M. Studium vlivu parametrů na pohyb elektrodových skvrn v modelu zhášecí

komory elektrického přístroje. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a

komunikačních technologií, 2016. 84 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

[3] SAMOHEJL, M. Rozšíření možností optické diagnostiky spínacího oblouku. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 56s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

[4] Boulos, M. I., Fauchais, P., Pfender, E.: Thermal Plasmas, Volume 1, Springer Science & Business Media, 1994

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 28.5.2018

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce popisuje vznik a vlastnosti elektrického oblouku. Jsou zde uvedeny některé elektrické přístroje a principy, které se používají k uhašení oblouku. Hlavní část se věnuje návrhu, konstrukci a testování parametrického modelu zhášecí komory, která umožňuje vysokorychlostním kamerám zaznamenat jeho pohyb. Z těchto záznamů je následně pomocí vytvořeného programu 3DMaker zrekonstruován trojrozměrný model elektrického oblouku, který je výstupem této práce.

## **Klíčová slova**

Elektrický oblouk, vypínače, spínací elektrické přístroje, zhášecí komora, vysokorychlostní kamera, parametrický model zhášecí komory, trojrozměrná rekonstrukce, 3D model

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with an electrical arc formation and its properties. The thesis also describes some of the electrical devices and principles, which are used for arc extinction. It is mainly focused on design, construction and testing of model of the LV quenching system, which allows high speed cameras to record arc movement. Recorded images are then used to create three-dimensional reconstruction of the electric arc with help of created program 3DMaker. The final reconstruction is the output of this work.

## **Keywords**

Electric arc, switches, switching electric devices, quenching chamber, high-speed camera, model of the LV quenching system, three-dimensional reconstruction, 3D model

## **Bibliografická citace:**

BUCHTA, M. *Diagnostika plazmatu vypínacího pochodu za pomoci dvou vysokorychlostních kamer*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D..

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Diagnostika plazmatu vypínacího pochodu za pomoci dvou vysokorychlostních kamer jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **28. května 2018**

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Valentovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne **28. května 2018**

.....

podpis autora

# Obsah

1 Úvod.....	1
2 Vznik elektrického oblouku a principy jeho zhášení.....	2
2.1 Vznik elektrického oblouku .....	2
2.1.1 Vznik elektrického oblouku při zapínání .....	3
2.1.2 Vznik elektrického oblouku při vypínání .....	4
2.2 Vlastnosti elektrického oblouku.....	4
2.2.1 Stejnoseměrný oblouk .....	4
2.2.2 Střídavý oblouk.....	6
2.3 Zhášení elektrického oblouku .....	7
2.3.1 Magnetické vypínače .....	7
2.3.2 Plynové vypínače s SF <sub>6</sub> .....	9
2.3.3 Vakuové vypínače .....	10
2.4 Spínací přístroje nízkého napětí.....	11
2.4.1 Magnetické vyfukování.....	11
2.4.2 Stykače .....	12
2.4.3 Jističe.....	13
3 Vysokorychlostní kamery .....	17
3.1 Základní parametry .....	17
3.1.1 Ohnisková vzdálenost objektivu .....	17
3.1.2 Expoziční čas .....	17
3.1.3 Clona .....	18
3.1.4 Citlivost ISO .....	18
3.1.5 Snímač.....	18
3.2 Vysokorychlostní kamera Photron SA-X2 .....	19
3.3 Vysokorychlostní kamera i-SPEED 726.....	20
4 Parametrický model zhášecí komory .....	22
4.1 Parametry komory.....	22
5 Výsledky měření .....	25
5.1 Nastavené parametry kamer .....	25
5.2 Úvodní experimenty.....	25
5.3 Provedené úpravy.....	27
5.4 Výsledky pokusů.....	28
6 trojrozměrná Rekonstrukce elektrického oblouku .....	30
6.1 Google SketchUp .....	30
6.2 Matlab .....	32
6.2.1 Úprava záznamů.....	32
6.2.2 Program 3DMaker .....	34

6.2.3 Zpracování trojrozměrné rekonstrukce .....	37
7 Závěr .....	40
Literatura .....	42
Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	43
Seznam příloh.....	44



# Seznam obrázků

Obr. 2-1 Vznik elektronové laviny [1] .....	3
Obr. 2-2 Obvod oblouku s předřadným rezistorem [1].....	5
Obr. 2-3 Statická V-A charakteristika oblouku [1] .....	5
Obr. 2-4 Dynamická V-A charakteristika oblouku [1].....	6
Obr. 2-5 Zhášecí komora s izolačním roštem [1] .....	8
Obr. 2-6 Štěrbínová zhášecí komora [1].....	8
Obr. 2-7 Desky ocelového roštu s výřezy [1] .....	9
Obr. 2-8 Autopneumatický vypínač v zpanuté poloze (vlevo) a ve vypnuté poloze (vpravo) [1] .....	10
Obr. 2-9 Oblouk ve vakuu [1].....	11
Obr. 2-10 Vypínač s magnetickým vyfukováním oblouku [1].....	12
Obr. 2-11 Elektromagnetický stykač (vlevo) a schéma zapojení (vpravo) [1].....	13
Obr. 2-12 Malý jistič nn (řez) [2] .....	14
Obr. 2-13 Vypínací charakteristika malého nn jističe [4] .....	15
Obr. 3-1 Velikost clony a otvoru clony [6] .....	18
Obr. 3-2 Rozměry vysokorychlostní kamery Photron SA-X2 (bez objektivu) [8]....	19
Obr. 3-3 Rozměry vysokorychlostní kamery i-SPED 726 (bez objektivu) [9] .....	20
Obr. 4-1 Parametrický model zhášecí komory bez zhášecího roštu .....	23
Obr. 4-2 Pohled ze strany vyfukovacích otvorů .....	23
Obr. 4-3 Pohled ze strany po odejmutí oddělitelné části bočního krytu .....	23
Obr. 4-4 Podélný řez parametrického modelu zhášecí komory.....	24
Obr. 4-5 Reálná parametrická komora s těsněním a zhášecím roštem.....	24
Obr. 5-1 Snímek pořízený kamerou i-SPEED 726 při prvním pokusu (čelní pohled) .....	26
Obr. 5-2 Snímek pořízený kamerou Photron SA-X2 při prvním pokusu (boční pohled) .....	26
Obr. 5-3 Snímek pořízený kamerou i-SPEED 726 při druhém pokusu (čelní pohled) .....	27
Obr. 5-4 Snímek pořízený kamerou Photron SA-X2 při prvním pokusu (boční pohled) .....	27
Obr. 5-5 Opálení způsobené hořením elektrického oblouku na rozích elektrod .....	28
Obr. 5-6 Úprava povrchu elektrod.....	28
Obr. 5-7 Původní připojení kabelů .....	28
Obr. 5-8 Nové připojení kabelů.....	28
Obr. 6-1 Umístění fotografií a vytvořené pomocné objekty .....	31
Obr. 6-2 Vykreslení křivky určující střed elektrického oblouku v prostoru .....	31

Obr. 6-3 Výsledná podoba trojrozměrné rekonstrukce elektrického oblouku pomocí programu Google SketchUp .....	31
Obr. 6-4 Originální, neupravený snímek.....	33
Obr. 6-5 Snímek s vysokou hodnotou šumu .....	33
Obr. 6-6 Vhodně upravený snímek s nízkou hodnotou šumu.....	33
Obr. 6-7 Výběr oblasti, která bude uložena.....	33
Obr. 6-8 Uživatelské rozhraní programu 3DMaker .....	34
Obr. 6-9 Pozastavený program 3DMaker s náhledem na aktuálně vytvořený 3D model elektrického oblouku. ....	35
Obr. 6-10 Synchronizace se záznamem z osciloskopu, $t=0,4$ ms .....	37
Obr. 6-11 Synchronizace se záznamem z osciloskopu, $t=7,2$ ms .....	38
Obr. 6-12 Synchronizace se záznamem z osciloskopu, $t=9,8$ ms .....	38
Obr. 6-13 Synchronizace se záznamem z osciloskopu, $t=16,2$ ms .....	39

## Seznam tabulek

Tab. 3.1 Závislost rozlišení snímků na frekvenci snímání [8].....	20
Tab. 3.2 Závislost rozlišení snímků na frekvenci snímání [9].....	21
Tab. 5.1 Nastavené parametry pro jednotlivé pokusy a velikosti naměřených proudů .....	29

# 1 ÚVOD

Spínací a jistící elektrické přístroje jsou zařízení, která slouží k vypínání, zapínání, nebo jištění elektrických obvodů. Tuto funkci musí vykonávat spolehlivě, a přitom nezpůsobit žádná bezpečnostní rizika. Při vykonávání jejich činnosti dochází ke vzniku elektrického oblouku, který nepříznivě působí na tyto přístroje. Analýza tohoto děje je důležitá pro jejich další vývoj. Pro pochopení celého procesu je potřeba se seznámit s principem vzniku elektrického oblouku a funkcí jednotlivých elektrických přístrojů.

Aby bylo možné diagnostikovat vznik, hoření a uhašení elektrického oblouku, je potřeba navrhnout zařízení, které umožní realizovat průběh takového děje a bude schopno měnit jeho parametry. Zároveň však musí odolat všem účinkům elektrického oblouku a umožnit jeho pozorování.

Celý děj trvá jen velmi krátkou chvílí a je lidským okem nepostřehnutelný. Je tedy potřeba použít zařízení, jako je vysokorychlostní kamera, které vytvoří zpomalený záznam a umožní pozorování i takto rychlého děje.

Pořízené snímky lze potom samostatně analyzovat, nebo s nimi dále pracovat. Ze dvou na sebe kolmých záznamů lze vytvořit trojrozměrnou rekonstrukci elektrického oblouku, která poslouží k názornější prezentaci jeho tvaru v průběhu hoření, což je předmětem této práce.

## **2 VZNIK ELEKTRICKÉHO OBLOUKU A PRINCIPY JEHO ZHÁŠENÍ**

Při zapínání a vypínání elektrického obvodu o velkém výkonu se potýkáme s doprovodnými jevy. Jedním z těchto jevů je elektrický oblouk. Z pohledu přístrojů, které mají za úkol připojit, nebo odpojit obvod od přívodu elektrické energie se jedná o nepříznivý jev, který je ale důležitý pro zmaření zbytkové energie. Na úspěšnost zhášení mají velký vliv i výsledné parametry obvodu. Následující kapitola se zabývá principem vzniku elektrického oblouku, jeho uhašením a přístroji, na kterých je úspěšné zapnutí nebo vypnutí elektrického obvodu závislé.

### **2.1 Vznik elektrického oblouku**

Elektrický výboj je jev, který nastává při průchodu proudu v dielektrickém prostředí. Aby mohl elektrický výboj vzniknout, je potřeba do takového prostředí přivést, nebo v něm vytvořit elektricky nabitě částice. To je možné například přivedením napětí na elektrody. Podle typu prostředí mezi elektrodami, velikostí napětí a proudu vznikají různé druhy výbojů. Mezi nejčastější výboje patří elektrický oblouk.

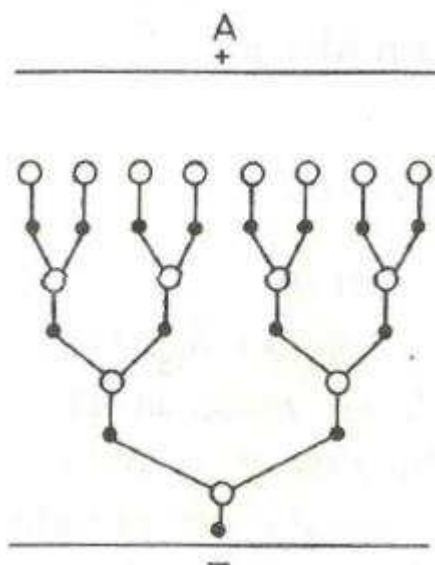
Pro popis vzniku elektrického oblouku budeme uvažovat plynné prostředí mezi elektrodami. Plyn je tvořen molekulami, které se pohybují všemi směry a různou rychlostí. Při takto chaotickém pohybu dochází ke srážkám jednotlivých molekul. Mohou nastat dva druhy srážek, pružné a nepružné. Při pružné srážce molekul dochází pouze ke změně rychlosti a směru pohybu. Při nepružných srážkách se kinetická energie může spotřebovat na disociaci molekul. Při disociaci dochází k rozpadu molekul na jednotlivé atomy.

Volné atomy mají tendenci se znovu spojovat v molekuly a doba jejich existence je velmi krátká, i tak ale může dojít ke srážce atomu s jinou částicí. Tyto srážky opět dělíme na pružné a nepružné. Při nepružné srážce dochází k nabuzení nebo k ionizaci atomu. Nabuzení je stav atomu, při kterém jeden z jeho okrajových elektronů v obalu přemístěn na nestabilní dráhu a při návratu do stabilní vyzáří energii v podobě fotonu. Pokud je energie vytvořená srážkou dostatečně velká, dochází k ionizaci, tedy oddělení elektronu z obalu neutrálního atomu a vzniku kladného iontu.

Tyto ionty jsou dále urychlovány elektrickým polem mezi elektrodami, záporné ionty jsou lehčí a pohybují se rychleji, kladné ionty jsou naopak těžší a pomalejší. Pokud se na své dráze spojí s iontem opačné polarity dochází k rekombinaci. Pro vznik jakéhokoli výboje je důležité, aby ionizační pochody převládali nad rekombinačními. Jestliže tyto pochody probíhají pouze v blízkosti

elektrod nazýváme takový výboj koróna. Při zvyšování intenzity elektrického pole může vzniknout jiskra nebo elektrický oblouk jako následek elektronové laviny. Rozdílem mezi jiskrou a obloukem je, že jiskra existuje pouze krátkou chvíli, kdežto elektrický oblouk hoří do té doby, než dojde k uhašení pomocí vnějších vlivů.

Elektron uvolněný z katody, nebo vzniklý ionizací je urychlován elektrickým polem. Na své dráze se sráží s neutrálními atomy. Při takové srážce dojde k ionizaci a uvolnění elektronu, který je opět urychlován elektrickým polem a sráží se s dalšími neutrálními atomy, nastává lavinový efekt, který je znázorněn na Obr. 2-1. [1]



Obr. 2-1 Vznik elektronové laviny [1]

### 2.1.1 Vznik elektrického oblouku při zapínání

Na kontaktech elektrického přístroje ve vypnutém stavu je rozdíl potenciálu rovný napětí zdroje. Při zapínání dochází k přibližování těchto kontaktů, a tím roste intenzita elektrického pole mezi nimi. Pokud intenzita elektrického pole překročí elektrickou pevnost prostředí, dojde ke vzniku koróny, díky které dojde k vytvoření elektronové laviny a následnému zapálení elektrického oblouku.

Takto vzniklý elektrický oblouk trvá jen velmi krátkou dobu, a to pouze do doby, dokud nedojde k vodivému spojení kontaktů. Ke vzniku elektrického oblouku při zapínání dochází nárazovou ionizací, obvykle, pokud je napětí na elektrodách vyšší než 300 V. Aby nedocházelo k opalování kontaktů, musí být jejich pohyb co nejrychlejší, tím se zkrátí doba trvání oblouku. Pokud však bude pohyb příliš rychlý, může dojít k odrazu kontaktů a vzniku nového oblouku tepelnou ionizací a k natavení, nebo dokonce svaření kontaktů.

Dalším důvodem vzniku elektrického oblouku při zapínání může být nerovnost povrchu kontaktů. Při předchozích spínáních může vlivem natavení dojít k přenosu materiálu z jedné elektrody na druhou. Přenesený materiál vytvoří na kontaktech výstupky. Při zapínání může dojít ke spojení těchto výstupků a jejich vypaření. Při nízké rychlosti pohybu kontaktů vzhledem k rychlosti vypařování dojde ke vzniku elektrického oblouku tepelnou ionizací. Předejít tomu lze vhodnou úpravou kontaktů (tvaru, povrchu). [1]

### 2.1.2 Vznik elektrického oblouku při vypínání

V zapnutém stavu jsou kontakty k sobě přitlačovány vnější silou. Při rozepínání kontaktů dochází ke snižování přitlačné síly. Pokud je materiál ploch kontaktů z měkkého materiálu, dojde k vytvoření můstků mezi kontakty. Tyto můstky jsou vlivem velké proudové hustoty a narůstající teploty odpařeny a ve vzniklých parách kovů vzniká tepelnou ionizací elektrický oblouk.

Pokud je materiál ploch elektrod z pevného materiálu s vysokou teplotou tavení, nedojde k vytvoření můstků při oddalování kontaktů. I přes to ale může dojít k vytvoření oblouku. Kontakty jsou při rozepínání zahřáty na teplotu blízkou teplotě tavení, což má za následek snížení energie potřebné na uvolnění elektronů. Po rozepnutí kontaktů dojde k vytržení elektronů z katody a následnému lavinovému efektu a vzniku oblouku. [1]

## 2.2 Vlastnosti elektrického oblouku

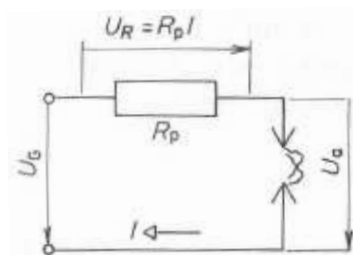
Elektrický oblouk vzniká ve velmi krátké době, většinou v několika mikrosekundách. Jedná se o výboj, který se projevuje především intenzivním vyzařováním světla, malým obloukovým napětím, velkou hustotou proudu a vysokou teplotou v katodové skvrně. Je schopen samostatné existence, pokud nedojde k jeho uhašení pomocí některého z vnějších vlivů. Elektrický oblouk, můžeme rozdělit podle druhu napětí v obvodu, ve kterém hoří, na stejnosměrný a střídavý oblouk. [1]

### 2.2.1 Stejnosměrný oblouk

Elektrický oblouk je komplexní děj, který závisí na mnoha faktorech. Odvodit charakteristiku oblouku je možné pouze pozorováním a opakováním experimentů. Ayrtonová odvodila výraz pro charakteristiku:

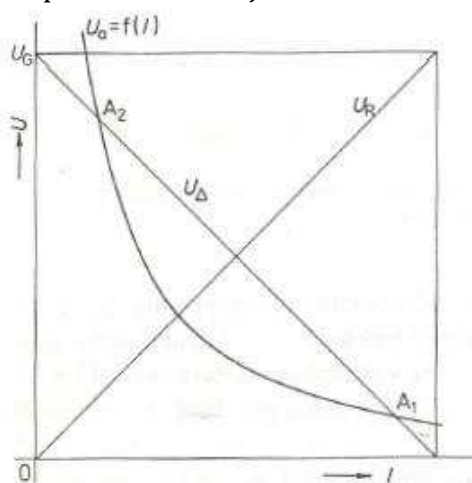
$$U_a = \alpha + \beta l_a + \frac{\gamma + \delta l_a}{I_a} \quad (V; V, V \cdot m^{-1}, m, VA, VA \cdot m^{-1}, m, A) \quad (2.1)$$

Rovnice Ayrtonové platí především pro malé oblouky a poměrně malé proudy. Známe-li charakteristiku oblouku a zanedbáme malou kapacitu obvodu a nízkou indukčnost oblouku je jeho stabilita určena pouze odporem rezistoru zapojeného s ním do série (předřadníku). Výsledný obvod vypadá následovně:



**Obr. 2-2 Obvod oblouku s předřadným rezistorem [1]**

Z obvodu vyplývá, že součet úbytků napětí na předřadníku  $U_R$  a odporu oblouku  $U_a$  je rovno napětí zdroje. To je jednou z podmínek stabilního hoření oblouku. Grafické řešení odpovídá následující charakteristice:



**Obr. 2-3 Statická V-A charakteristika oblouku [1]**

$U_a = f(I)$  je závislost úbytku napětí na oblouku na protékajícím proudu obloukem,  $U_D$  je rozdílová přímka daná rozdílem napětí na oblouku a předřadníku.  $U_R$  značí úbytek napětí na předřadníku. Body  $A_1$  a  $A_2$  značí místa v charakteristice, ve kterých může oblouk hořet. Stabilně však může hořet pouze v bodě  $A_1$ . Pokud při výboji dojde ke zvětšení protékajícího proudu úbytek napětí na předřadníku a oblouku vzroste na hodnotu vyšší, než je napětí dodávané zdrojem. Zdroj nedokáže dodat potřebný výkon, vzroste odpor oblouku a vrátí se zpět do bodu  $A_1$ . Při zmenšení protékajícího proudu bude součet úbytků napětí na předřadníku a oblouku nižší, než je napětí zdroje. Následkem se jeho odpor sníží a vzroste teplota a oblouk se vrátí opět do bodu  $A_1$ . V bodě  $A_1$  je hoření oblouku stabilní a je splněna Kaufmannova podmínka stability:

$$\frac{dU_a}{dI} + \frac{dU_R}{dI} > 0 \quad (2.2)$$

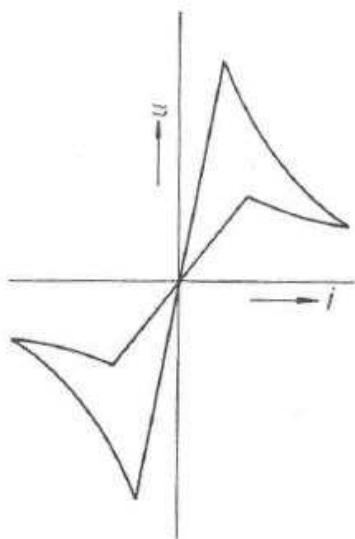
Uhašení oblouku je možné dosáhnout například prodloužením jeho délky, čímž se zvýší hodnota jeho odporu, a tedy i úbytek napětí na oblouku, což celou charakteristiku posune do oblasti vyšších napětí. Body  $A_{1,2}$  zaniknou a oblouk



uhasne. Dalšími možnostmi jsou například zvýšení odporu  $R_p$  v obvodu, nebo snižováním napětí zdroje, což v praxi většinou nelze realizovat. [1]

### 2.2.2 Střídavý oblouk

Pokud se napětí na elektrodách a proud protékající obloukem periodicky mění s časem, slouží k popisu stability oblouku tzv. dynamická charakteristika.



Obr. 2-4 Dynamická V-A charakteristika oblouku [1]

V první půlperiodě stoupá napětí na elektrodách souhlasně s napětím zdroje, dokud nedojde k překročení tzv. zapalovacího napětí. Poté se hodnota napětí sníží na hořící napětí oblouku a po nějaký čas se jeho hodnota mění jen velmi málo. Po dobu hoření oblouku dochází ke změně proudu, který jím protéká. Ke konci půlperiody se lehce zvýší napětí a proud procházející obloukem se blíží k nulové hodnotě.

Z dynamické charakteristiky lze vyčíst, že hodnota napětí je vyšší při vytváření oblouku než při jeho zhášení. To je způsobeno stavem, v jakém se nachází soustava po předcházející nule proudu. Napětí musí být natolik velké, aby ionizační pochody začaly převládat nad rekombinačními a aby došlo k pokrytí energetických ztrát při vzniku výboje. Naopak při zániku oblouku klesá proud k nule a je tedy potřeba méně ionizovaných částic pro jeho přenos. Část energetických ztrát oblouku je kryta těmito nadbytečnými náboji a napětí může být o to nižší.

Tvar dynamické charakteristiky výrazně ovlivňuje frekvence, velikost proudu a předřadného rezistoru, ale také způsob chlazení a délka oblouku, nebo materiál elektrod. [1]

## 2.3 Zhášení elektrického oblouku

Aby došlo k vypnutí silnoproudého obvodu, musí dojít k odpojení od zdroje. Realizaci takového odpojení zajišťují pohyblivé kontakty ve vypínačích. Při rozpojení těchto kontaktů vzniká elektrický oblouk, který způsobuje namáhání a opotřebení funkčních dílů vypínače a představuje pro něj nežádoucí jev. Aby došlo k úspěšnému vypnutí, musí dojít k takovým pochodům, aby se obnovila elektrická pevnost mezi kontakty. Z tohoto pohledu je ale přítomnost oblouku velmi užitečná. Většina akumulované elektrické energie se v hořícím oblouku přemění v tepelnou energii a tím se podstatně sníží velikost vzniklého přepětí.

Jak už bylo zmíněno, pro vznik jakéhokoli výboje je důležité, aby převládaly ionizační pochody nad rekombinačními a při hoření oblouku byly alespoň v rovnováze. Pro uhašení elektrického oblouku je důležitý opačný stav, deionizace. Rekombinační pochody musí převládat nad ionizačními. Tedy, aby se co nejvíce kladných iontů spojilo se zápornými elektrony a vznikl neutrální atom. Při takovém spojení se uvolní energie spotřebovaná při ionizaci. Při potrojně srážce, kdy se účastní rekombinačního pochodu právě tři částice, je tato energie převzata třetí částicí. Pokud se účastní pouze dvě částice, je energie buď vyzařena v podobě světla, nebo předána elektrodě ve formě tepla. To má za následek ohřátí elektrod a může dojít k jejich opalování.

Aby bylo možné oblouk uhasit, jsou vypínače vybavené zhášedly. Úkolem zhášedla je odvést přebytečnou energii vzniklou při rekombinačních pochodech a snížit dobu hoření oblouku urychlením difúzních pochodů v plazmatu. Částice mají tendenci pohybovat se z oblasti s vyšší teplotou do oblasti s teplotou nižší. Díky tomuto pohybu nastává radiální difúze částic, která podporuje deionizaci oblouku a v oblouku probíhá spontánně. Spontánně se podaří uhasit pouze oblouky malého výkonu. Zhášedlo vyvolává vzájemný pohyb zhášecího média a zhášeného plazmatu. Pokud zhášedlo využívá k vyvolání pohybu vlastní energii přerušovaného obvodu, například pomocí magnetického pole buzeného vypínacím proudem, mluvíme o zhášedlech s vlastní energií. Zhášedla s cizí energií vyvolávají pohyb předem připravenou energií, například stlačeným vzduchem. [1]

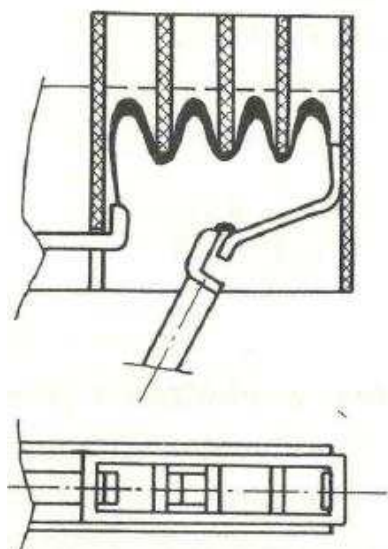
### 2.3.1 Magnetické vypínače

Jednou z možností, jak uhasit elektrický oblouk, je prodloužením jeho délky. Následkem toho se zvýší jeho odpor, sníží se hodnota procházejícího proudu a zvýší se úbytek napětí na oblouku. Takového principu zhášení využívají právě magnetické vypínače.

Magnetické vypínače řadíme do kategorie vypínačů s vlastní zhášecí energií. Využívá se interakce magnetického pole oblouku a magnetického pole vytvořeného vypínačem při průchodu vypínacího proudu. Vzájemným působením obou polí

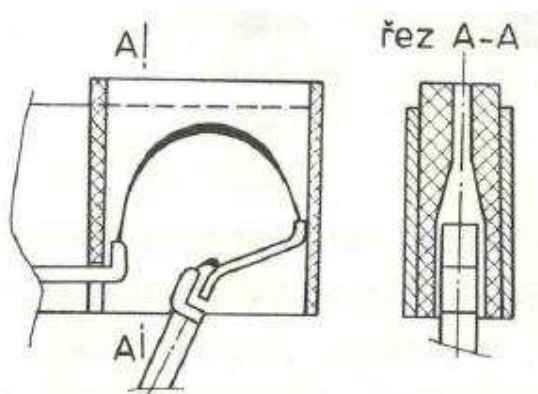
dojde k rychlému pohybu oblouku vzduchem, směrem do zhášecí komory. Tím se dostává do styku s velkým počtem neionizovaných částic, což podporuje rekombinaci. Prostý pohyb oblouku je ale k jeho uhašení nedostačující, proto je magnetický vypínač vybaven také deionizační komorou. Ty mohou být dvojího provedení: zhášecí komory izolační a zhášecí komory kovové.

*Izolační zhášecí komory* dělíme také na dva typy: s komorou roštovou a s komorou štěrbinovou.



**Obr. 2-5 Zhášecí komora s izolačním roštem [1]**

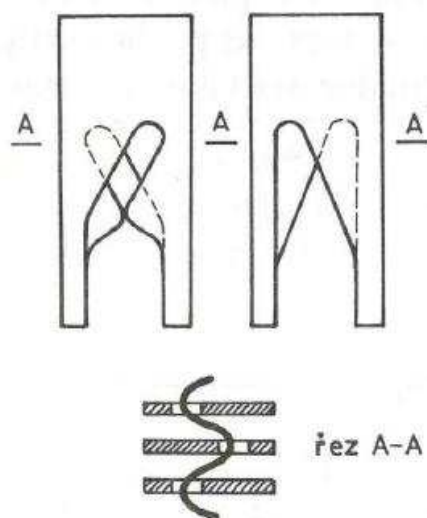
Principem izolační roštové zhášecí komory je co největší prodloužení délky oblouku. Ten naráží na hrany roštu, kde se zadrží a vznikne několik průhybů, což vede ke zvětšení odporu. Zvětšení povrchu oblouku je výhodné pro radiální výměnu částic v nule proudu při vypínání střídavého proudu. Nevýhodou této konstrukce je, že dochází k zahřívání materiálu žeber a dochází k jejich opalování. Při vypínání velkých proudů dochází vlivem vysoké teploty k nárůstu ionizovaného plynu, který se nestačí odvádět z vypínače a vlivem zotaveného napětí dochází k opětovnému zapálení oblouku.



**Obr. 2-6 Štěrbinová zhášecí komora [1]**

Štěrbínová zhášecí komora využívá ke zhášení oblouku principu odvodu tepla, čímž dochází ke zvětšení odporu. Jak je vidět na Obr. 2-6 vzájemná vzdálenost stěn komory se postupně snižuje. Oblouk je magnetickým polem vtahován do štěrbin. To zapříčiní deformaci kruhového jádra oblouku. Tím se zvýší účinnost chlazení žáruvzdornými stěnami komory a prodlouží se délka oblouku. Omezení vypínacích schopností je stejné jako u komory s izolačním roštem, zahlcením prostoru vypínače ionizovaným plynem.

*Kovové zhášecí komory* jsou vybaveny roštem, se kterými přijde oblouk do kontaktu po vyfouknutí do zhášecí komory vlivem interakce magnetických polí. V první fázi je oblouk vtahován mezi jednotlivé destičky roštu. Ty jsou vyrobeny většinou z oceli, které díky vysoké permeabilitě pomáhají oblouk vtahovat. Poté se rozdělí na několik menších oblouků spojených do série, které se dále mezi destičkami pohybují. Každý takto vzniklý oblouk se projevuje vlastním anodovým a katodovým úbytkem napětí a celkově se zvětšuje odpor oblouku. Konstrukce roštu je navržena tak, aby došlo k co největšímu prodloužení délky oblouku a jednoduššímu rozdělení na menší oblouky. Je tak učiněno prostorovým prostřídáním nesouměrných výřezů v deskách roštu. [1]



Obr. 2-7 Desky ocelového roštu s výřezy [1]

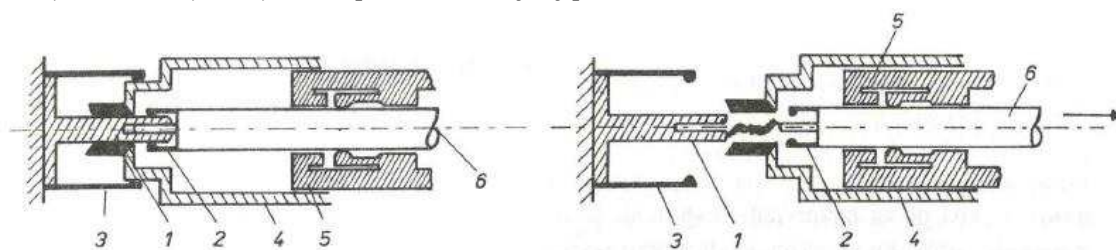
### 2.3.2 Plynové vypínače s SF<sub>6</sub>

Fluorid sírový (SF<sub>6</sub>) je elektro negativní plyn, který je bezbarvý, bez zápachu a nejedovatý. Používá se pro zhášení elektrického oblouku zejména v sítích vn, nebo vvn. Mezi jeho vlastnosti patří: velká elektrická pevnost, nehořlavost, chemická stálost a dobrá tepelná vodivost.

Použití SF<sub>6</sub> je velmi výhodné z hlediska, jak působí na elektrický oblouk. Je to elektronegativní plyn, ten se vyznačuje tím, že jeho molekuly se dobře spojují s volnými elektrony a vznikají neutrální ionty s velkou hmotností a malou

pohyblivostí. Dobrá tepelná vodivost SF<sub>6</sub> způsobuje lepší chlazení oblouku. Tyto vlastnosti se nejvíce projeví při zhášení střídavého oblouku, kde po průchodu nulou velmi rychle stoupá elektrická pevnost prostředí.

Je několik způsobů, jak využít SF<sub>6</sub> ke zhášení elektrického oblouku, jedním z nejrozšířenějších je autopneumatický vypínač.



Obr. 2-8 Autopneumatický vypínač v zpanuté poloze (vlevo) a ve vypnuté poloze (vpravo) [1]

Konstrukce autopneumatického vypínače se skládá z pevného kontaktu 1, pohyblivého kontaktu 2, který je spojen s tyčí olejopneumatického pohonu 6, pružného kontaktu 3, pohyblivé válcové komory 4 a pístem 5, který je spojen s nepohyblivou částí. Celá konstrukce je zapouzdřena ve vzduchotěsném těle vypínače.

Při vypínání dojde nejprve k rozpojení pružného kontaktu 3 a válcové komory 4, celý proud následně protéká mezi pevným kontaktem 1 a pohyblivým kontaktem 2. Po jejich rozpojení dojde ke vzniku elektrického oblouku. Zároveň se však s tělem pohyblivého kontaktu pohybuje i komora 4. Dojde ke krátkodobému stlačení SF<sub>6</sub> uvnitř komory a jeho následnému vypuštění. Proud SF<sub>6</sub> uhasí elektrický oblouk a vnikne do prostoru vypínače, kde dojde k vyrovnání tlaků. [1]

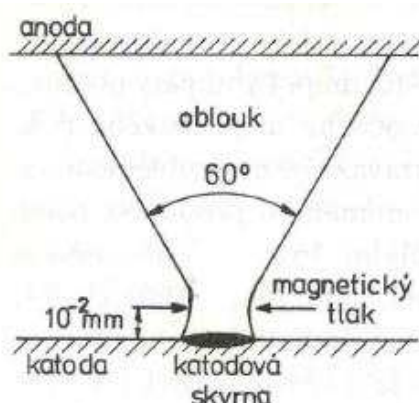
### 2.3.3 Vakuové vypínače

Využití vakuových vypínačů je výhodné z důvodu jejich dobrých vlastností. Jsou tiché, nehořlavé, nevyfukují ionizované plyny, nebo plameny. Princip jejich fungování je jednoduchý, mají malý potřebný zdvih a málo se opotřebovávají. Využívají se především v sítích nn a vn.

Pokud je tlak plynu nižší než  $10^{-3}$  Pa nazývá se takové prostředí vysoké vakuum. Výhodou takového prostředí při vypínání elektrického oblouku je, že se prodlužuje střední volná dráha elektronů až na vzdálenost delší, než je vzdálenost kontaktů. Elektrická pevnost prostředí je mnohem vyšší, než při atmosférickém tlaku a nemůže tedy dojít k nárazové ionizaci volnými elektrony.

I přesto, že se vakuum jeví jako dokonalý izolant může dojít k zapálení elektrického oblouku. Díky nedokonalé hladkému povrchu kontaktů mohou při vypínání vzniknout páry z odpařeného materiálu a v nich tepelnou ionizací vznikne oblouk, jak je popsáno v kapitole 2.1.2. Materiál kontaktů a jejich opracování výrazně ovlivňuje dobu života vypínače. Hoření oblouku ve vakuu se

projevuje teplou katodovou skvrnou, která je zdrojem kovových par. Na anodě je oblouk výrazně širší a chladnější.



Obr. 2-9 Oblouk ve vakuu [1]

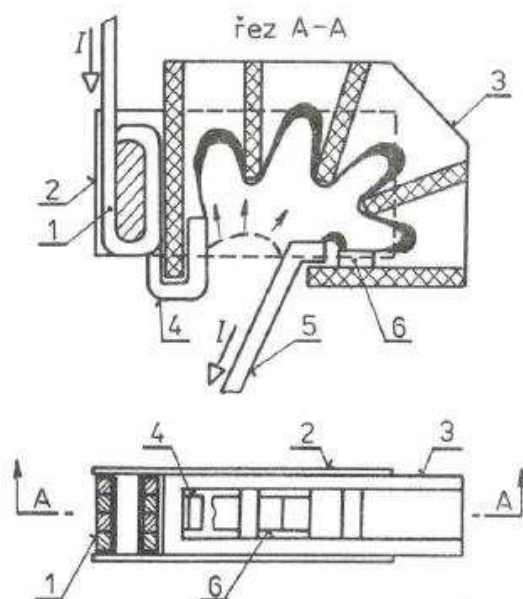
Vakuové vypínače se používají výhradně pro vypínání střídavého proudu. Po průchodu proudu přirozenou nulou, dochází k nedostatečnému přísunu kovových par z anody a oblouk zaniká. Velmi rychle se poté obnovuje elektrická pevnost mezi kontakty. Vakuová zhášedla uhasí oblouk v první nule proudu. Problémem může být utržení proudu před jeho přirozenou nulou, čímž dojde k velkému přepětí. To může zapříčinit průchod nižšího proudu, kdy se neodpaří dostatek kovu z katody a oblouk rychle zanikne. Řešením může být přidání příměsí s vyšší emisivitou par do kontaktního materiálu katody. [1]

## 2.4 Spínací přístroje nízkého napětí

Jsou to elektrické přístroje, které slouží k zapínání, vypínání, nebo jištění elektrických obvodů. Jeden přístroj ovšem většinou nedokáže spolehlivě plnit všechny zmíněné úkony. Proto se zvláště vyrábí stykače sloužící k zapínání a vypínání obvodu za provozních podmínek a jističe k ochraně před účinky nadproudů, tj. přetížení a zkratů. Požadavky na tyto přístroje jsou jednoduchost, nízká cena a spolehlivost.

### 2.4.1 Magnetické vyfukování

Princip magnetického vyfukování je využíván u roštových i izolačních štěrbinových zhášecích komor. Ty jsou navrženy tak, že průchodem vypínaného proudu dojde k vytvoření elektromagnetického pole. Vzniklý elektrický oblouk je tímto polem vháněn do zhášecí komory.



**Obr. 2-10 Vypínač s magnetickým vyfukováním oblouku [1]**

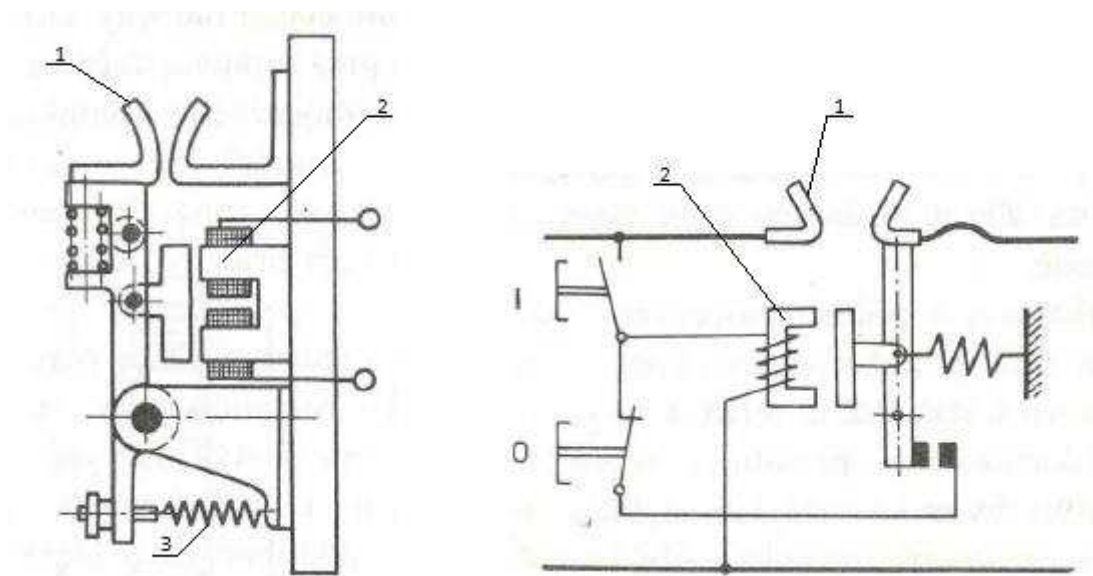
Průchodem vypínaného proudu  $I$  dojde ke vzniku magnetického pole cívkou 1 a pólovými nástavci vyrobených z feromagnetického materiálu 2. Magnetický tok vybuzený cívkou 1 se uzavírá přes zhášecí komoru 3. Na vnitřní straně komory je umístěno žebrování, tvořené jednotlivými destičkami. Elektrický oblouk vznikne rozpojením pevného kontaktu 4 a pohyblivého kontaktu 5. Interakcí elektromagnetického pole komory a oblouku je vháněn do žebrování. Zde dojde ke styku s jednotlivými žebry a stěnami komory. Oblouk je prodloužen a účinně ochlazován, tím se zvětšuje jeho elektrický odpor. [1]

## 2.4.2 Stykače

Jedná se o přístroj určený pro časté, většinou krátkodobé, spínání především motorových obvodů. Stykače mají jednu stabilní polohu, většinou vypnutou. Do druhé polohy se uvádějí zapínacím mechanismem (vačkový, pneumatický, elektromagnetický) a zůstávají v ní, dokud působí. Do výchozí polohy se vrací pomocí vypínací pružiny 3. Kontakty 1 jsou navrženy tak, aby kladly co nejmenší odpor při vypínacím procesu, tedy s čelním stykem.

Elektromagnetický stykač je nejpoužívanější provedení stykače. Do zapnuté polohy se uvádí pomocí elektromagnetu 2, který je napájen z pomocného zdroje, nebo přímo ze sítě.





**Obr. 2-11 Elektromagnetický stykač (vlevo) a schéma zapojení (vpravo) [1]**

Princip činnosti je shodný s elektrickým relé. Stykač setrvává v sepnuté poloze pouze po dobu, kterou působí obsluha na tlačítko. Aby mohl stykač setrvat v zapnuté poloze pouhým stisknutím tlačítka, musí se použít zapojení s párem činných pomocných kontaktů a dvojicí tlačítek. Jedno s výchozí polohou zapnutou a druhé s vypnutou. Stisknutím zapínacího tlačítka dojde k přivedení proudu do cívky a sepnutí hlavních a pomocných kontaktů. Pomocný kontakt přemostí zapínací tlačítko a stykač zůstává v zapnuté poloze, dokud nedojde ke stisknutí vypínacího tlačítka. Vypínací tlačítko přeruší proud do cívky a kontakty se pomocí vypínací pružiny rozejdou.

Stykače bývají doplněny o časově závislou tepelnou spoušť k vypínání přetížení a částečně tedy můžou simulovat práci jističe. Nejsou však vhodné k vypínání zkratových proudů. Proto bývá do série se stykačem zařazena pojistka, nebo jistič. [1]

### 2.4.3 Jističe

Jističe jsou elektrické přístroje, které chrání prvky elektrického obvodu před účinky přetížení a zkratu odpojením od přívodu elektrické energie. Aby toho byly schopny, musí mít velký jmenovitý vypínací proud. Obvykle se jedná o 20 – 100 násobek jmenovitého proudu. Neslouží ovšem k častému zapínání a vypínání obvodu. Jistič se skládá ze tří hlavních částí, je to kontaktní soustava, zámek a spoušť.

Zámek drží kontakty v zapnuté poloze proti síle vypínacích pružin. K jeho vybavení může dojít působením spouště při poruše na zařízení. Je možné ho vybavit také manuálně tlačítkem, nebo dálkově elektromagnetickou spouští.

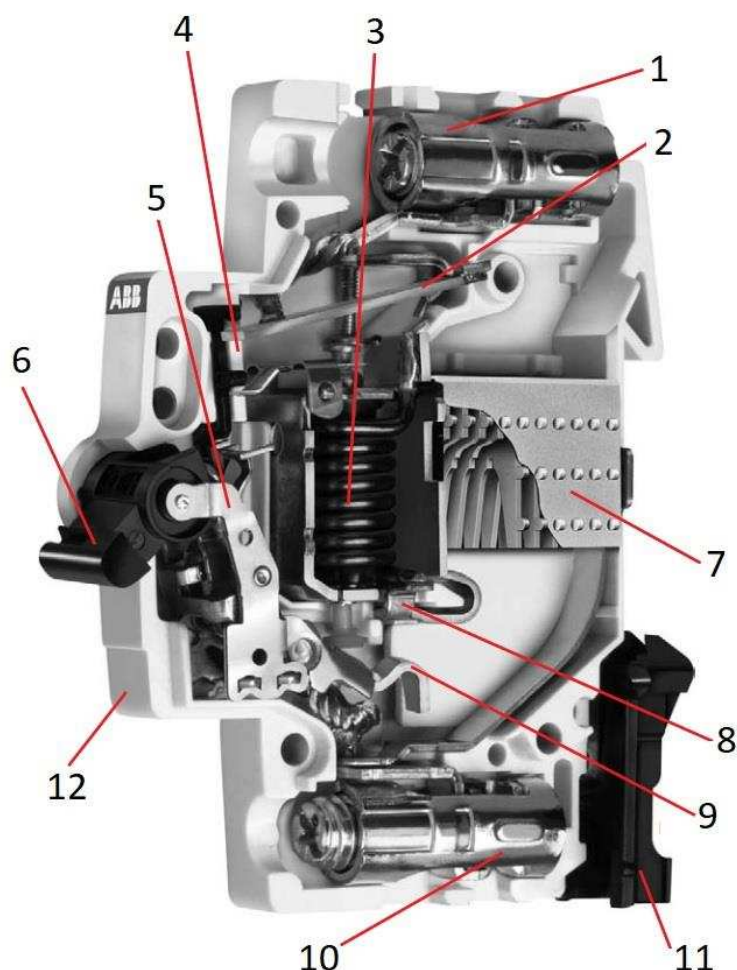


Zámky dělíme na jednoduché a složené. Jednoduché jsou tvořeny západkou nebo prolomenými páky. Spojení několika jednoduchých zámků tvoří volnoběžku.

Spoušť slouží k vybavení zámku, pokud dojde k tepelnému, nebo elektromagnetickému působení proudu. Je tvořena proudovou dráhou a mechanismem k vybavení zámku.

Jističe dělíme podle velikosti jmenovitého proudu. Na malé jističe do jmenovitého proudu 63 A, střední pro proudy od 100 do 630 A, a na velké s jmenovitým proudem nad 1000 A.

Nejčastěji se vyrábí jističe malé, které se používají k jištění světelných obvodů, spotřebičů, menších motorů. Jejich kontakty jsou vyrobeny slitinou stříbra s příměsí teplotně odolné složky (C, Ni, W). Díky nízké hmotnosti kontaktů a vystřelovací cívce jsou jističe schopny vypnout obvod velmi rychle. Vystřelovací cívka vybavuje volnoběžku jističe a zároveň je mechanicky propojena s pohyblivým kontaktem k urychlení jeho oddálení od pevného kontaktu. [1]

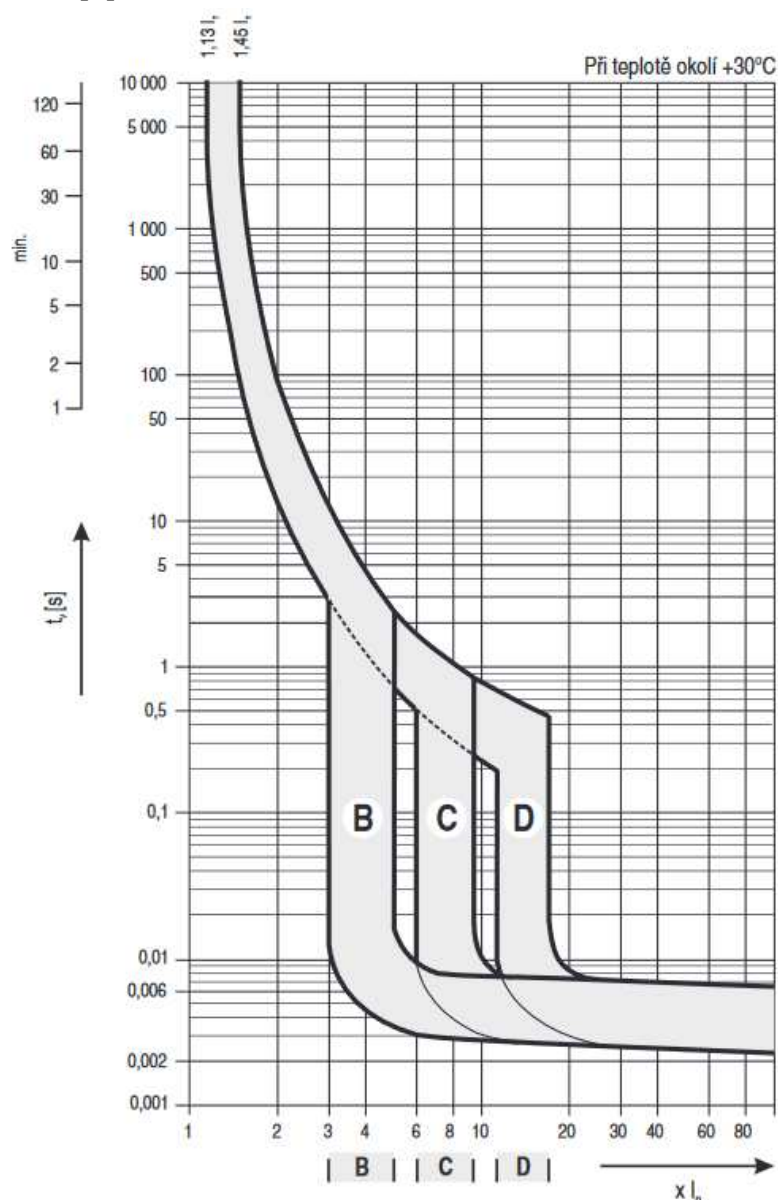


Obr. 2-12 Malý jistič nn (řez) [2]

Malý jistič nn se skládá z těchto částí: Horní svorka 1, bimetal nadproudové spouště 2, vinutí zkratové spouště 3, volnoběžka 4, aretační mechanismus 5, ruční

páka 6, zhášecí komora 7, pevný kontakt s proudovým záhybem 8, pohyblivý kontakt 9, spodní svorka 10, uchycení k liště rozvaděče 11, místo pro popisek 12.

Proudová dráha je tvořena svorkou 1, bimetalem nadproudové spouště 2, zkratovou spouští 3, kontakty 8, 9 a svorkou 10. V případě poruchy dojde k vybavení jedné ze spouští, to je dáno vypínací charakteristikou jističe (Obr. 2-13). Následně se rozpojí kontakty a vytvoří se elektrický oblouk. Proud poté teče přes záhyb pevného kontaktu 8, elektrický oblouk a pohyblivý kontakt 9. Ten je urychlován odpudivou silou magnetického pole vzniklého v proudovém záhybu 8 a pohyblivém kontaktu 9. Oblouk je vtahován elektrodynamickou silou do kovové zhášecí komory 7, kde se rozdělí na několik malých oblouků a s narůstajícím odporem uhasíná. [3]



Obr. 2-13 Vypínací charakteristika malého nn jističe [4]

Na rozdíl od velkých jističů, není možno u malých jističů uživatelsky měnit vypínací charakteristiku, ale je dána výrobcem. Výrobce takový jistič vyrábí ve variantách např. B, C, D. Jednotlivé varianty se liší nastavením zkratové (elektromagnetické) spouště. Charakteristika B se používá pro jištění obvodů, kde nedochází k proudovým rázům (světelné, zásuvkové obvody) a zkratová spoušť je nastavena na 3 – 5 násobek jmenovitého proudu. Charakteristika C se využívá pro jištění obvodů, kde dochází k proudovým rázům (obvody s motory), zde je zkratová spoušť nastavena na 6 – 9 násobek jmenovitého proudu. A charakteristika D se použije v obvodech s vysokými proudovými rázy (jištění transformátorů), kde zkratová spoušť vybaví při 12 - 16násobku jmenovitého proudu. Vybavení tepelné spouště závisí na velikosti přetížení a době, po kterou přetížení působí. [4]

## 3 VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMERY

Vysokorychlostní kamera je zařízení určené pro záznam dějů, které nastanou ve velmi krátkém čase a jsou tedy lidským okem nepostřehnutelné. Jejich hlavním parametrem je snímkový frekvence, která dosahuje až stovky tisíc snímků za sekundu (FPS). Díky tomu je možné tyto děje pozorovat zpomaleně a analyzovat je.

Rychlost snímání je omezena především paměťovým médiem, které nestíhá ukládat velké objemy dat vzniklých snímků. Aby došlo k redukci objemu dat, je nutno se zvyšujícími se FPS snížit rozlišení, čímž ale dochází ke snížení informační hodnoty snímků.

### 3.1 Základní parametry

Parametry kamery určují její vlastnosti a možnosti při pořizování záznamů. Jsou udávány výrobcem a obsahují informace důležité při jejím výběru, aby co nejlépe odpovídala požadavkům uživatele.

#### 3.1.1 Ohnisková vzdálenost objektivu

Ohnisková vzdálenost je jedním ze základních parametrů objektivů. Je udávána v milimetrech a dává informaci o tom, jak široký záběr bude pořízen. Čím je ohnisková vzdálenost menší, tím širší bude úhel záběru.

Úhel záběru nezávisí pouze na ohniskové vzdálenosti objektivu, ale také na velikosti snímače kamery. Pro snímače platí, že se zvětšující plochou roste zorný úhel.

Ohnisková vzdálenost ovlivňuje hloubku ostroty. Hloubku ostroty je možné popsat jako šířku pruhu, který bude na fotografii ostrý. Vše v popředí, nebo v pozadí tohoto pruhu bude rozostřené. Čím bude ohnisková vzdálenost menší (širší záběr), tím bude hloubka ostroty větší. [5]

#### 3.1.2 Expoziční čas

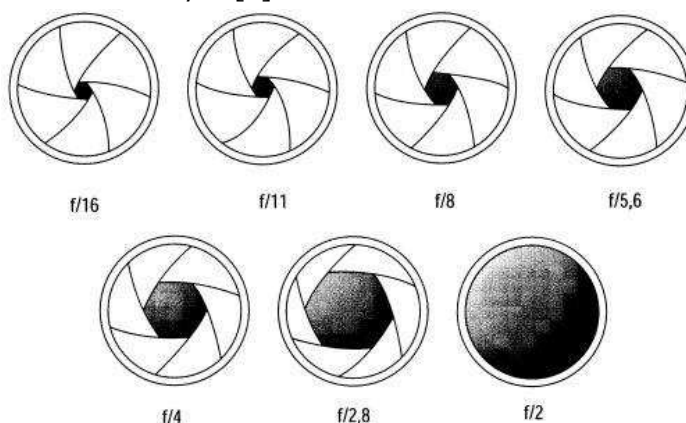
Expoziční čas (rychlost závěrky) udává dobu, po kterou je závěrka otevřená a na čip kamery může dopadat světlo. Čím delší bude čas otevření, tím více světla na čip dopadne a výsledný snímek bude světlejší a naopak.

Pokud je potřeba snímat rychle se pohybující objekty, je potřeba zvolit co nejkratší expoziční čas, aby nedošlo k jejich rozmazání. Pokud bude zvolen dlouhý čas, dojde k rozmazání pozorovaného objektu, protože po dobu snímání udělá objekt mnoho pohybů a všechny budou zaznamenány do jednoho snímku. [5]

### 3.1.3 Clona

Clona je mechanická část objektivu mnohoúhelníkového až kruhového tvaru a reguluje množství procházejícího světla na čip. Velikost průchodu (nastavitelný) udává clonové číslo, čím je větší, tím je clona větší, projde méně světla a snímek bude tmavší.

Velikost clony má také vliv na hloubku ostrosti výsledného snímku. Čím bude clonové číslo větší (menší otvor), tím bude větší hloubka ostrosti a větší část snímku bude zaostřená. Nejnižší možné clonové číslo je uvedeno jako parametr objektivu například ve tvaru  $f/2$ . [5]



Obr. 3-1 Velikost clony a otvoru clony [6]

### 3.1.4 Citlivost ISO

ISO je parametr, který uvádí citlivost snímače na světlo. S vyšší nastavenou hodnotou ISO (citlivostí) snímače je potřeba méně světla, ale také narůstá hladina šumu ve snímku. Což se projevuje zvýšenou zrnitostí, horším podáním barev a snížením ostrosti. Proto je vhodné nastavit citlivost na co nejnižší možnou hodnotu. [5]

### 3.1.5 Snímač

Snímač je část kamery, která zaznamenává světlo, které prošlo objektivem a převádí jej na elektronické signály, které jsou dále zpracovány procesorem. Snímač je tvořen čočkami, které usměrňují světlo na fotodiody, které zaznamenávají intenzitu dopadajícího světla. Aby byla zaznamenána i informace o barvě, je mezi čočky a fotodiody umístěn barevný filtr, který propustí jen určitou vlnovou délku světla (barvu).

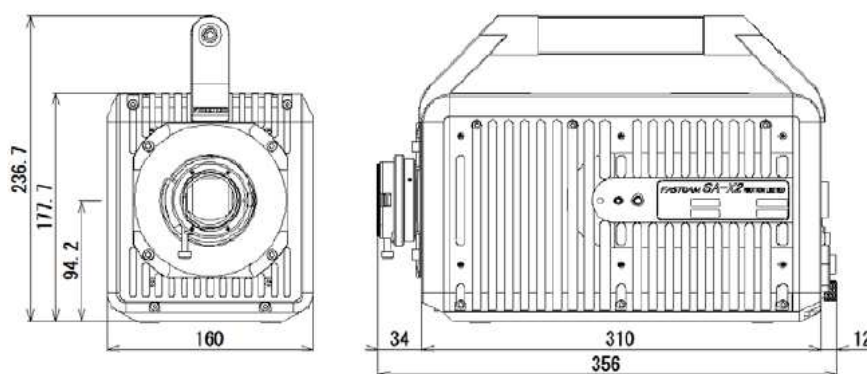
Jedním z hlavních parametrů snímače je jeho velikost, ta přímo ovlivňuje hloubku ostrosti. Čím větší bude snímač, tím bude hloubka ostrosti menší. Protože je ale zároveň ovlivněna ohniskovou vzdáleností objektivu, je výhodnější pro práci s kamerou větší velikost snímače.

Dalším důležitým parametrem je rozlišení snímače (počet bodů), udávaný v megapixelech (Mpx). Kvalita snímku závisí na velikosti jednotlivých pixelů. Například, pokud bude mít malý snímač 24 Mpx, budou jednotlivé pixely mnohonásobně menší, než třeba u velkého snímače s 12 Mpx. To se projeví sníženou kvalitou snímku, především zvýšenou hladinou šumu.

U vysokorychlostních kamer je použit CMOS snímač, který umožňuje zaznamenávat světlo jen určitým výřezem z celkové velikosti snímače. To je výhodné při vysokorychlostním snímání s velkým množstvím snímků za sekundu, kde by se při využití plné velikosti snímače nestíhaly velké objemy dat ukládat. [5][7]

### 3.2 Vysokorychlostní kamera Photron SA-X2

- Rozměry:



Obr. 3-2 Rozměry vysokorychlostní kamery Photron SA-X2 (bez objektivu) [8]

- Základní technické údaje:

Model:	1000K – monochromatické provedení
Snímač:	CMOS, 1024x1024 pixelů, rozměr pixelu 20 $\mu\text{m}$ , 12 bit
Citlivost ISO:	25,000
Závěrka:	Elektronická závěrka (rychlost až 293ns)
Rozlišení videa:	V závislosti na snímací frekvenci (Tab. 3.1)
Objektiv:	S bajonetem F-mount, G-mount

**Tab. 3.1 Závislost rozlišení snímků na frekvenci snímání [8]**

Frekvence snímání [FPS]	Rozlišení (počet pixelů)	
	Horizontální	Vertikální
1000 až 12,500	1024	1024
13,500	1024	1000
15,000	1024	896
20,000	1024	672
30,000	896	496
40,000	768	416
50,000	640	384
60,000	512	376
81,000	512	256
100,000	384	264
150,000	256	216
200,000	256	152
324,000	256	72
480,000	128	48
900,000	128	8
1,080,000	128	8

### 3.3 Vysokorychlostní kamera i-SPEED 726

- Rozměry:



Šířka: 363 mm

Délka: 154 mm

Hloubka: 157 mm

**Obr. 3-3 Rozměry vysokorychlostní kamery i-SPEED 726 (bez objektivu) [9]**

- Základní technické údaje:

Model:	726R – monochromatické provedení
Snímač:	CMOS, 2048x1536 pixelů, rozměr pixelu 13,5μm, 12 bit
Citlivost ISO:	40,000
Závěrka:	Elektronická závěrka (rychlost až 277ns)
Rozlišení videa:	V závislosti na snímací frekvenci (Tab. 3.2)
Objektiv:	S bajonetem F-mount, G-mount, C-mount, EF-mount

**Tab. 3.2 Závislost rozlišení snímků na frekvenci snímání [9]**

Frekvence snímání [FPS]	Rozlišení (počet pixelů)	
	Horizontální	Vertikální
100	2048	1536
500	2048	1536
1000	2048	1536
2000	2048	1536
5000	2048	1536
8,512	2048	1536
10,000	1904	1410
12,742	1920	1080
15,000	1512	1134
20,000	1344	978
30,000	1064	798
50,000	1064	474
100,000	1064	228
200,000	1064	102
300,000	1064	60
500,000	1232	24
750,000	1120	12
1,000,000	336	42



## 4 PARAMETRICKÝ MODEL ZHÁŠECÍ KOMORY

Při návrhu parametrického modelu zhášecí komory se vycházelo z již otestované konstrukce navržené v diplomové práci (Studium vlivů parametrů na pohyb elektrodových skvrn v modelu zhášecí komory elektrického přístroje [7]).

Protože komora odolala tepelným i dynamickým účinkům vytvořených elektrickým obloukem, byly použity stejné rozměry jednotlivých dílů komory. Zachovány byly také její dobré vlastnosti jako jsou: jednoduchá výměna průhledného předního krytu, změnu vzdálenosti mezi elektrodami přidáním, nebo odebráním měděných vložek a možnost výměny bočního krytu s vyfukovacími otvory pro změnu tlakových poměrů v komoře.

Pro potřebu natáčení elektrického oblouku ze dvou směrů byla navržena úprava bočního krytu komory tak, aby v něm vznikl průhled. Kryt se skládá ze dvou částí, mezi které se vloží průhledný kryt z polykarbonátu. Obě části lze v případě znečištění průhledného krytu jednoduše oddělit a provést jeho výměnu.

### 4.1 Parametry komory

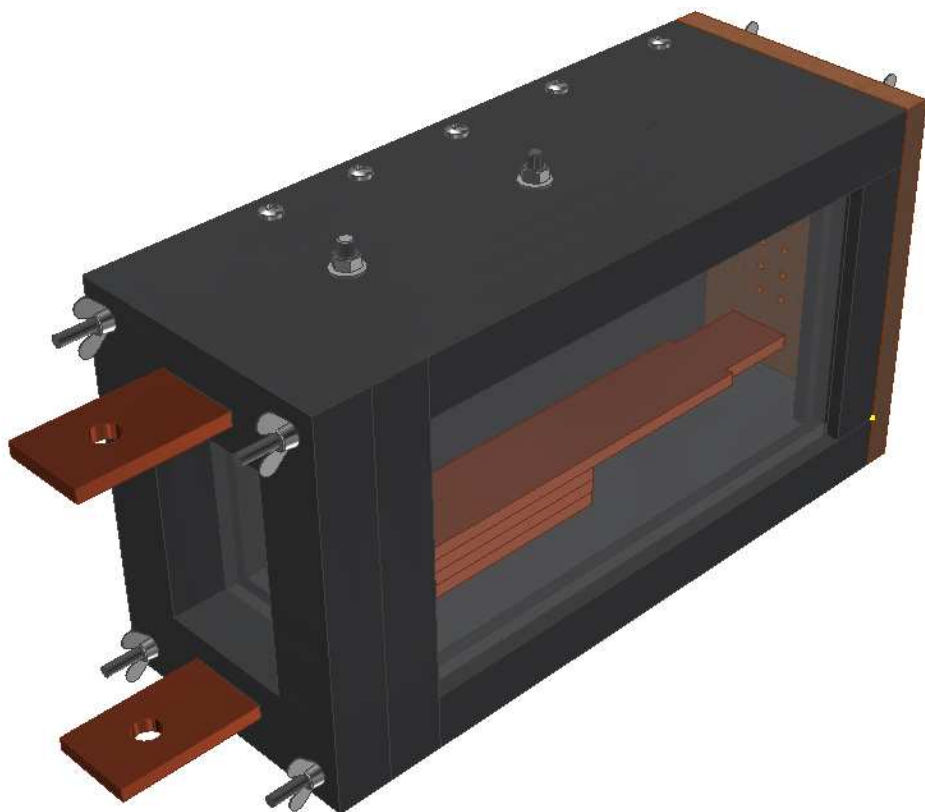
Komora je složena z jedenácti částí: základny, zadního krytu, vrchního krytu, bočního krytu s vyfukovacími otvory, bočního krytu s průhledem (dvě části), průhledného předního a bočního krytu, elektrod, měděných vložek a zhášecího roštu.

Všechny části jsou spojeny šrouby a maticemi, aby byla v případě potřeby umožněna výměna zničených částí. Mezery mezi jednotlivými částmi jsou utěsněny tak, aby plyn odcházel pouze vyfukovacími otvory a nedocházelo ke zkreslení v případě měření tlaků.

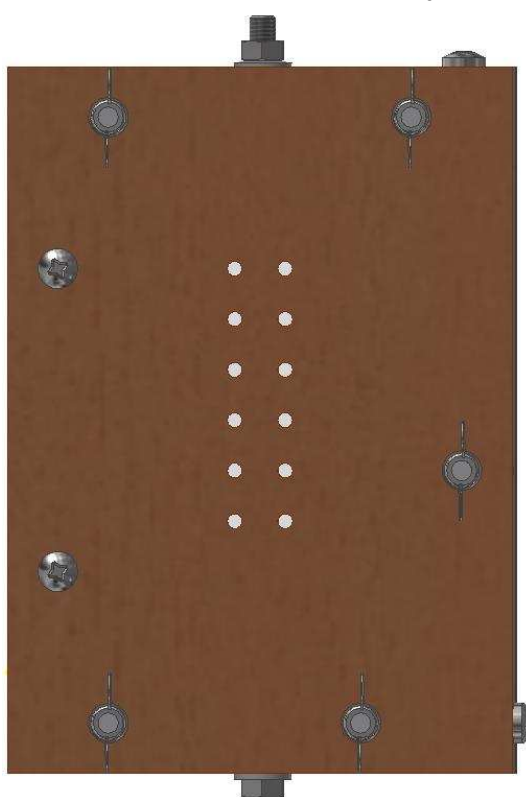
Zapálení oblouku se realizuje pomocí drátku připevněného šrouby mezi elektrody. Při průchodu elektrického proudu dojde k jeho zahřátí a přerušení, čímž vznikne mezi elektrodami elektrický oblouk.

Parametry komory:

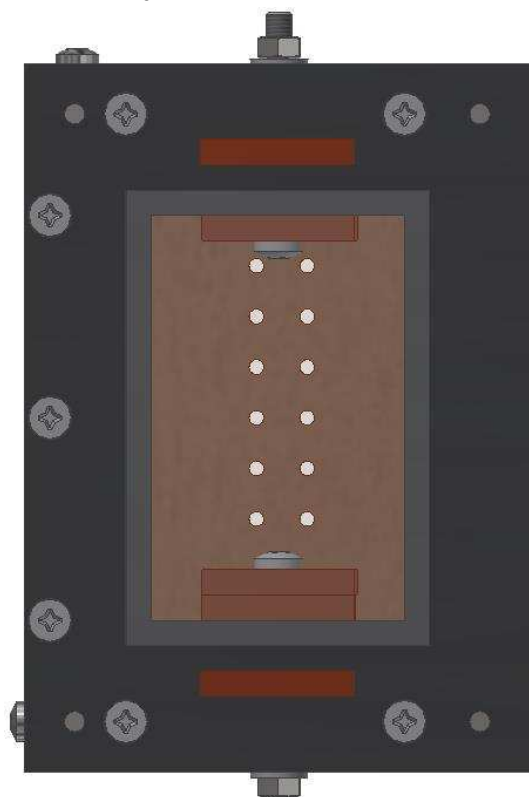
Nastavitelná vzdálenost elektrod:	[0,100] mm, možná změna po 5 mm
Velikost vyfukovacích otvorů:	Volitelná (při testu 3 x Ø5 mm)
Rozměry čelní průhledné plochy:	200 x 110 mm
Rozměr boční průhledné plochy:	60 x 90 mm
Rozměr elektrod:	205 x 5 x 30 mm (š x v x h)
Rozměr měděných vložek:	102,5 x 5 x 30 mm (š x v x h)



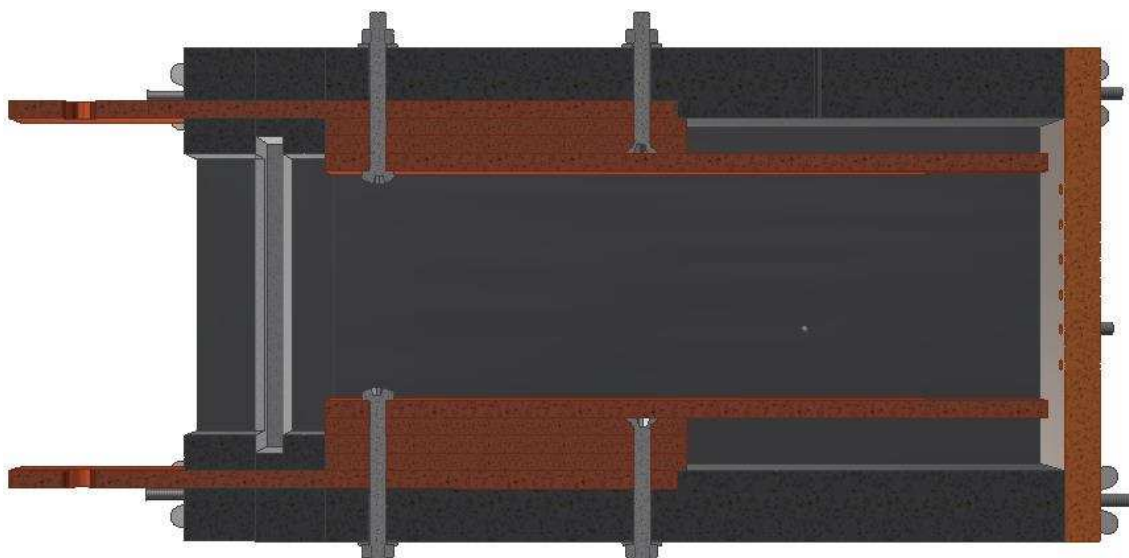
Obr. 4-1 Parametrický model zhášecí komory bez zhášecího roštu



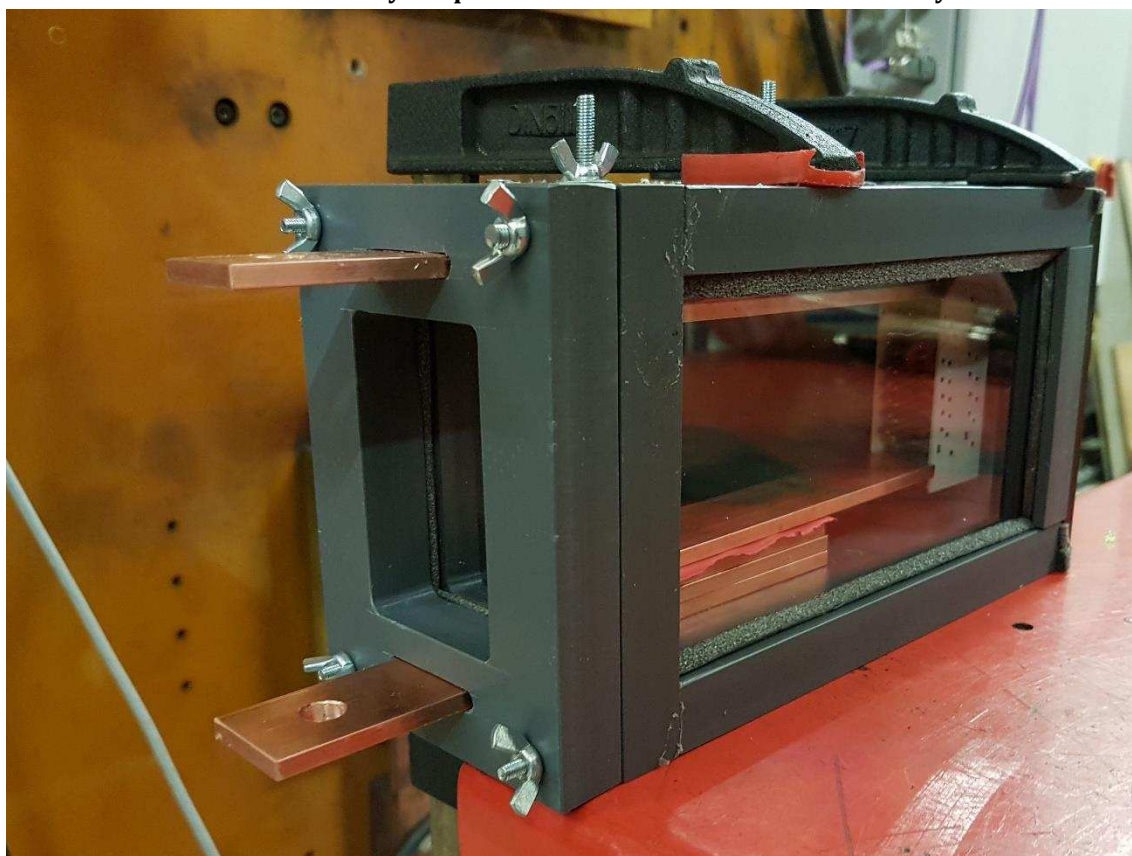
Obr. 4-2 Pohled ze strany vyfukovacích otvorů



Obr. 4-3 Pohled ze strany po odejmutí oddělitelné části bočního krytu



**Obr. 4-4 Podélný řez parametrického modelu zhášecí komory**



**Obr. 4-5 Reálná parametrická komora s těsněním a zhášecím roštem**

## 5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Měření a natáčení probíhalo v prostorech laboratoře spínacích přístrojů vědecko-technického parku profesora Lista. Komora byla zajištěna proti pohybu dvěma svorkami a upevněna k hydraulickému stolu. Mezi konce elektrod byl umístěn zhášecí rošt z jističe OEZ BD250.

Pro natáčení byly použity vysokorychlostní kamery popsané v kapitole č. 3. Kamera i-SPEED 726 byla namířena na čelní průzor (200 x 110 mm) a kamera Photron SA-X2 snímala boční průzor komory (60 x 90 mm).

### 5.1 Nastavené parametry kamer

Na modelu zhášecí komory byly provedeny dva úvodní testy, s těmito parametry:

Velikost napětí zdroje:	220 - 300 V~; 50 Hz
Velikost zkratového proudu:	1,39 - 3,6 kA
Vzdálenost elektrod:	60 mm
Velikost výfukových otvorů:	3 x Ø5 mm, 12 x Ø2 mm, 8 x Ø10 mm

Vysokorychlostní kamery byly umístěny v bezpečné vzdálenosti a s nastavenými parametry:

Pro i-SPEED 726:

Objektiv:	Nikon AF NIKKOR 180 mm
Clonové číslo:	f/22
Rychlost snímání:	10 000 FPS
Rozlišení:	1800 x 1000 pixelů
Citlivost snímače:	ISO 5000
Expoziční čas:	278 ns

Pro Photron SA-X2:

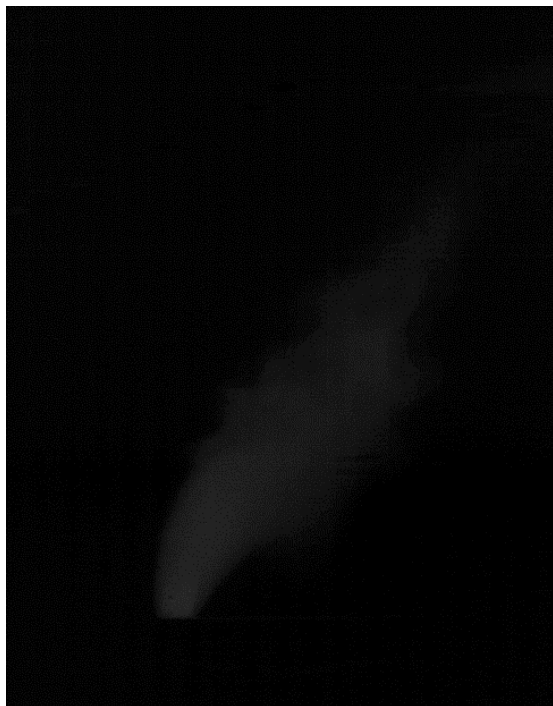
Objektiv:	Nikon AF-S MICRO NIKKOR 105 mm
Clonové číslo:	f/4
Rychlost snímání:	10 000 FPS
Rozlišení:	1024 x 1024 pixelů
Citlivost snímače:	ISO 25000
Expoziční čas:	290 ns

### 5.2 Úvodní experimenty

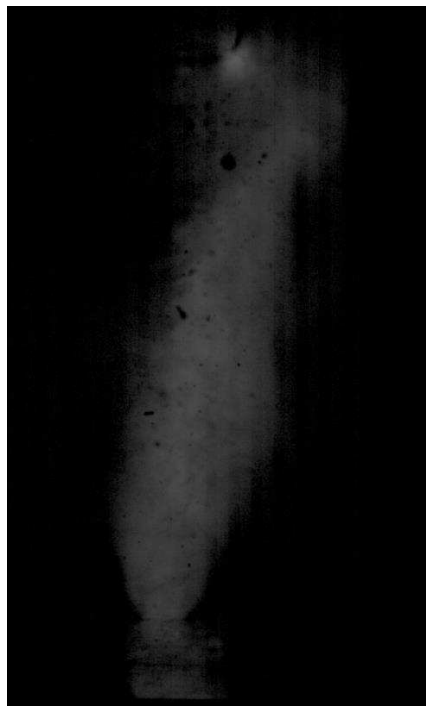
Aby bylo možné natočit hoření elektrického oblouku a záznam nebyl přexponovaný, byly před objektivy kamer nainstalovány neutrální šedé filtry.

Filtry byly zvoleny dle nastavení kamery a zkušenostech s nahráváním oblouku získaných z předchozích prací zabývajících se podobnou problematikou.

Pro první měření byl na kameru i-SPEED nasazen filtr ND 500 a na kameru Photron SA-X2 ND 1000. Výsledné snímky jsou zobrazeny na Obr. 5-1 a Obr. 5-2.



**Obr. 5-1 Snímek pořízený kamerou i-SPEED 726 při prvním pokusu (čelní pohled)**



**Obr. 5-2 Snímek pořízený kamerou Photron SA-X2 při prvním pokusu (boční pohled)**

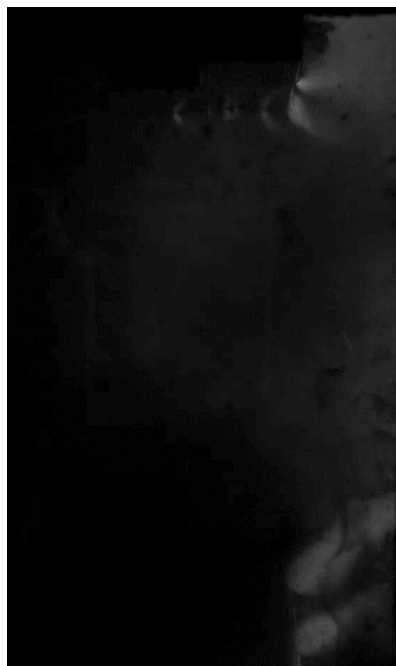
První pokus dopadl úspěšně, zhášecí komora odolala dynamickým i tepelným účinkům vytvořených elektrickým obloukem. Obě kamery pořídily záznam, na kterém lze sledovat zapálení, hoření a následné uhašení oblouku. Zhášecí komora je tedy vhodná pro monitorování tvaru a pohybu elektrického oblouku a nemusí se v tomto ohledu provádět žádné změny.

Snímky byly ovšem, jak je vidět na Obr. 5-1 ,podexponované. Úpravou jejich parametrů se podařilo zvýšit viditelnost oblouku (Obr. 5-2), ale za cenu zvýšené hladiny šumu.

Pro druhý pokus došlo k výměně neutrálních šedých filtrů ND 1000 a ND 500 za slabší filtry. Pro kameru i-SPEED byl zvolen ND 64 a pro kameru Photron SA-X2 ND 100. Také byl vyměněn čelní průzor, který byl znečištěn po prvním pokusu. Snímky pořízené pro druhý pokus jsou zobrazeny na Obr. 5-3 a Obr. 5-4.



Obr. 5-3 Snímek pořízený kamerou i-SPEED 726 při druhém pokusu (čelní pohled)



Obr. 5-4 Snímek pořízený kamerou Photron SA-X2 při prvním pokusu (boční pohled)

Také ve druhém testu komora odolala všem účinkům elektrického oblouku. Vzniklé snímky nebyly ani podexponované, ani přexponované a lze na nich pozorovat celý průběh hoření oblouku bez úpravy jejich parametrů. Nově instalované filtry se tedy ukázaly jako vhodné pro natáčení oblouku s parametry popsány v kapitole 5.1.

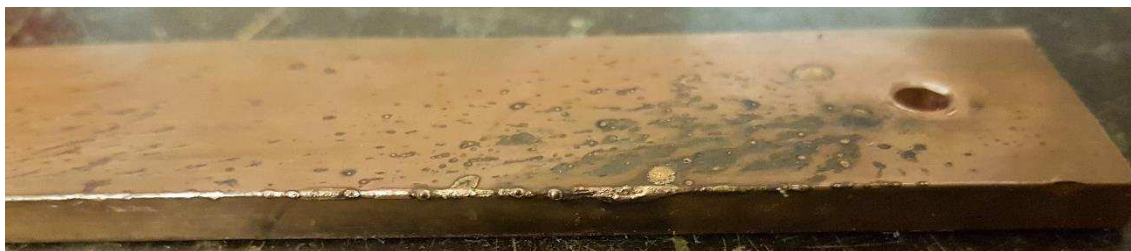
Na záznamu pořízeného při druhém pokusu si lze všimnout, že hoření oblouku probíhá v okrajových částech elektrod, kde dochází k jejich velkému opalování

Také lze pozorovat, že oblouk nehoří kolmo vzhůru, ale je ohnutý směrem k čelnímu průhledu, kde způsobuje znečištění průhledného krytu, což znemožňuje natáčení oblouku za tímto znečištěním.

### 5.3 Provedené úpravy

Po zkušenostech z úvodních experimentů byly provedeny dvě změny. Aby již nedocházelo k hoření oblouku na rozích elektrod, kde dochází k jejich největšímu opalování, byly elektrody natřeny průhledným lakem. Pouze uprostřed plochy elektrod byl vynechán nenatřený pruh, který vymezuje prostor, ve kterém může docházet k hoření elektrického oblouku.





**Obr. 5-5 Opálení způsobené hořením elektrického oblouku na rozích elektrod**

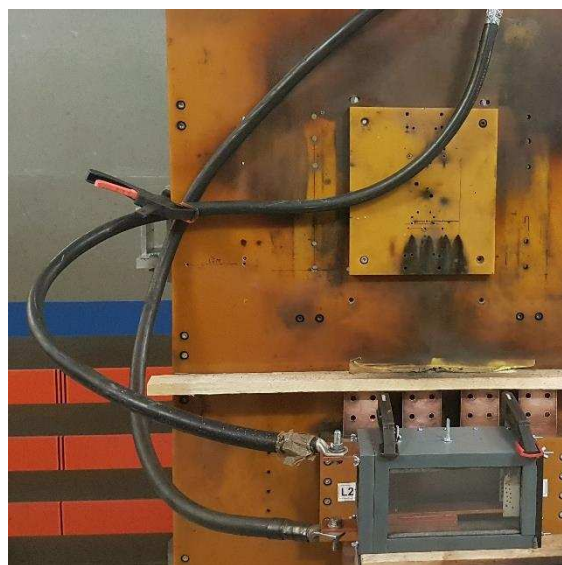


**Obr. 5-6 Úprava povrchu elektrod**

Druhá úprava se týkala způsobu připojení kabelů k přípojnícím parametrické komory. V úvodních experimentech byly kabely připojeny k přípojnícím z boku a společně tvořili tvar L. Byly také vedeny blízko za parametrickou komorou. Průchod proudu takto připojenými vodiči vytvářel magnetické pole, které způsobovalo ohyb elektrického oblouku směrem k průhlednému krytu komory. Proto došlo ke změně způsobu připojení přívodních kabelů, jak je vidět na Obr. 5-8, při kterém k průhybu elektrického oblouku již nedocházelo.



**Obr. 5-7 Původní připojení kabelů**



**Obr. 5-8 Nové připojení kabelů**

## 5.4 Výsledky pokusů

Bylo provedeno šest pokusů, jejichž cílem bylo sledovat chování elektrického oblouku v závislosti na změně napájecího napětí a velikosti vyfukovacích otvorů, a také pořídít co nejlepší záznamy pro následnou trojrozměrnou rekonstrukci.

Díky provedeným úpravám se podařilo eliminovat nedostatky, které byly pozorovány v úvodních experimentech. Hoření oblouku probíhalo již ve středu elektrod a nedocházelo tedy k opalování rohů a také nebyl pozorován průhyb elektrického oblouku.

**Tab. 5.1 Nastavené parametry pro jednotlivé pokusy a velikosti naměřených proudů**

Č.p.	U [V]	$I_{\max}$ [kA]	Vyfukovací otvory	Zapálení oblouku po nule proudu
1	220	1,436	3 x Ø5 mm	Ne
2	220	1,392	3 x Ø5 mm	Ne
3	300	2,148	3 x Ø5 mm	Ano
4	260	1,813	3 x Ø5 mm	Ano
5	260	1,910	12 x Ø2 mm	Ano
6	260	1,771	8 x Ø10 mm	Ne

*Pozn.: Všechny pokusy probíhaly při konstantní vzdálenosti elektrod 60 mm*

Z pozorování výsledných záznamů lze dojít k těmto závěrům. Elektrický oblouk intenzivněji hoří (vyzařuje světlo) v blízkosti katody a spíše v jednom bodě oproti anodě. Během hoření se postupně pohybuje z místa vzniku směrem do zhášecího roštu, přičemž poloha anodových skvrn se mění častěji a rychleji než katodových skvrn.

Se zvyšujícím se napětím roste pravděpodobnost, že dojde k zapálení oblouku po průchodu nulou proudu, z důvodu větší intenzity elektrického pole vůči pevnosti prostředí. Ale velikost napětí nemá vliv na tvorbu nové katodové skvrny před, nebo po nule proudu.

Větší vliv na tvorbu nové katodové skvrny má rozměr a počet vyfukovacích otvorů. Na záznamech pořízených při pokusech 4, 5 a 6 došlo k vytvoření nové katodové skvrny ještě před průchodem proudu nulou. Vyfukovací otvory také ovlivňují, zda dojde k zapálení oblouku po průchodu proudu nulou. Při pokusu č.6 byl oblouk nejvíce vtahován směrem do zhášecí komory. Plyn, který vzniká při hoření oblouku mohl lehce unikat velkými vyfukovacími otvory ven z komory a způsoboval jeho značné prodloužení. Nová katodová skvrna vznikla velmi blízko zhášecího roštu a k uhašení oblouku došlo ještě před průchodem proudu nulou.



## 6 TROJROZMĚRNÁ REKONSTRUKCE ELEKTRICKÉHO OBLOUKU

Pro vytvoření trojrozměrné rekonstrukce elektrického oblouku je zapotřebí znát minimálně 3 informace o jeho rozměrech, šířku, výšku a hloubku. Tyto informace získáme právě ze dvou na sebe kolmých záznamů pořízených pomocí vysokorychlostních kamer. Pro vytvoření trojrozměrné rekonstrukce oblouku je nutné použít počítačový software, který umožňuje 3D modelování. Jako první možnost byl zvolen program Google SketchUp. Důvodem byla především uživatelská nenáročnost a jednoduchý postup při vytváření 3D modelu. Tento program měl ovšem několik nedostatků, a proto byl v prostředí Matlab naprogramován program přímo pro rekonstrukci 3D oblouku ze dvou na sebe kolmých záznamů.

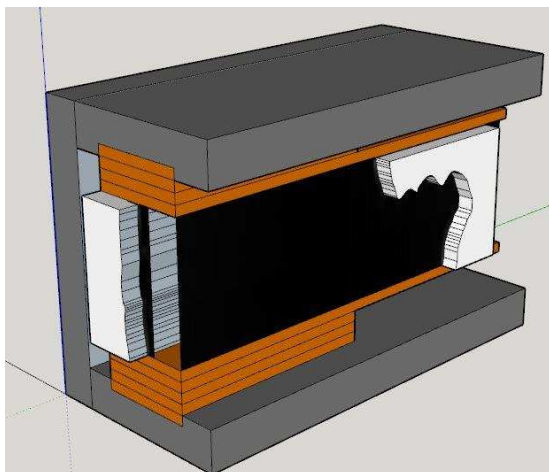
### 6.1 Google SketchUp

Jak už bylo zmíněno, pomocí tohoto programu lze poměrně jednoduchým způsobem zpracovat pořízené záznamy a následně vytvořit 3D model elektrického oblouku.

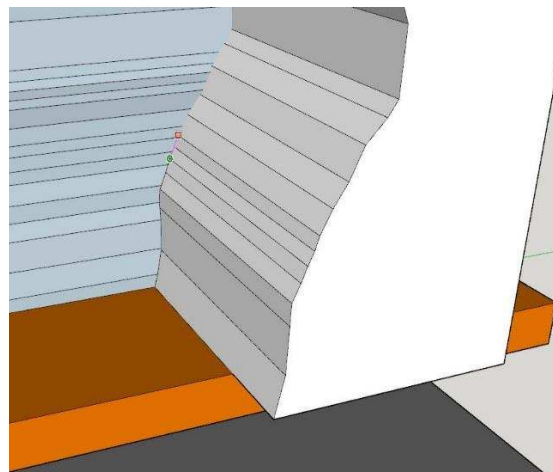
Prvním krokem při vytváření trojrozměrné rekonstrukce je vytvoření modelu zhášecí komory 1:1. Ta bude také sloužit jako základna se známými rozměry, pomocí které se pořízené snímky upraví na správnou velikost.

Program nabízí možnost importovat fotografie a poté s nimi manipulovat stejně jako s ostatními objekty. Takto importovanou fotografii je možné jednoduše zmenšit/zvětšit, právě na rozměr, který odpovídá velikosti oblouku v porovnání s 3D modelem zhášecí komory. Nejlepším způsobem je, když se předem u fotografií ořízne spodní a horní část, těsně po katodovou a anodovou skvrnu a umístí se přímo na elektrody, aby nedocházelo k nepřesnostem.

Do takto připravených fotografií je potřeba následně načrtnout křivku, která bude tvořit jednu stranu pomocného objektu. Jak je vidět na Obr. 6-2, dojde následně k překrytí těchto objektů a strany tvořené pomocnými křivkami udávají polohu středu elektrického oblouku.

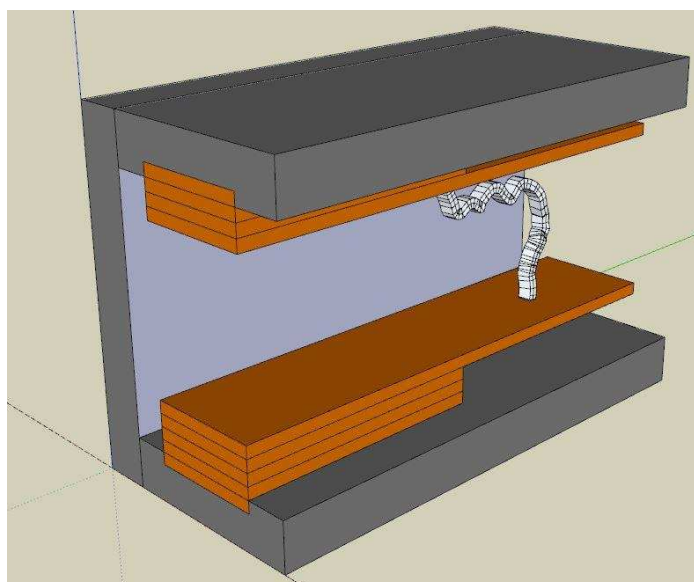


**Obr. 6-1 Umístění fotografií a vytvořené pomocné objekty**



**Obr. 6-2 Vykreslení křivky určující střed elektrického oblouku v prostoru**

Následně se provede smazání všech pomocných čar a zůstane pouze křivka, která udává informaci o poloze elektrického oblouku v prostoru. Pomocí nástroje Follow Me se této křivce dodá informace o šířce a hloubce oblouku.



**Obr. 6-3 Výsledná podoba trojrozměrné rekonstrukce elektrického oblouku pomocí programu Google SketchUp**

Nevýhoda tvorby trojrozměrného modelu elektrického oblouku pomocí Google SketchUp je v použití funkce Follow Me, kdy je náročné měnit šířku a hloubku těla oblouku. Tyto hodnoty se většinou mění a je jednodušší ponechat je na konstantní (průměrné) hodnotě. Další nevýhodou je časová náročnost tvorby 3D modelu. I při zanedbání měnící se šířky a hloubky trvá vytvoření jedné trojrozměrné rekonstrukce ze dvou snímků několik minut. Počet dvojic snímků pořízených kamerami se pro jeden záznam pohybuje mezi 100 – 200. Vytvoření animací pro každý průběh skládající se z vytvořených 3D modelů by tedy trvalo spoustu hodin. Proto bylo rozhodnuto, že se v programovacím prostředí Matlab vytvoří aplikace, která bude 3D modely tvořit automaticky a přesněji.

## 6.2 Matlab

Programovací prostředí a jazyk Matlab má velmi mnoho užitečných funkcí, které dávají uživateli spoustu možností, jak analyzovat, zpracovat a následně prezentovat vstupní data.

Pro trojrozměrnou rekonstrukci elektrického oblouku bylo využito především možnosti pracovat s maticemi, tvoření algoritmů, 3D vykreslování a vytvoření uživatelského rozhraní.

Spojením všech těchto funkcí byl vytvořen program 3DMaker, který dokáže automaticky načítat snímky pořízené kamerami a z nich následně tvořit a ukládat 3D rekonstrukce elektrického oblouku.

### 6.2.1 Úprava záznamů

Protože program 3DMaker pracuje se všemi pixely na snímcích, které mají nenulovou hodnotu jasu, je potřeba záznamy upravit tak, aby se eliminovaly chyby, a zároveň určit tělo oblouku. Úpravu záznamů lze provést například pomocí programu Photron FASTCAM Viewer (PFV), který je volně ke stažení na stránkách výrobce.

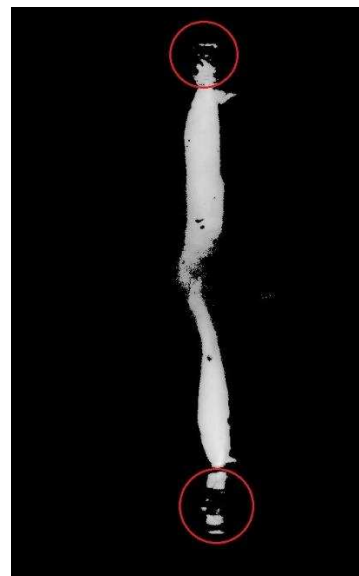
Jak už bylo zmíněno, program 3DMaker pracuje se všemi pixely s nenulovou hodnotou jasu a považuje je za část oblouku, proto je vhodné jako první krok upravit jasové rozložení záznamu. To se provede pomocí nástrojů kontrast, jas a gamma tak, aby bylo zřejmé, jaká část oblouku bude vykreslena. Vhodné je nastavit hodnotu gamma na nejnižší možnou hodnotu a poté upravovat hodnoty jasu a kontrastu tak, aby nebyl vykreslován šum, ale pouze tělo oblouku.



**Obr. 6-4**  
Originální,  
neupravený  
snímek

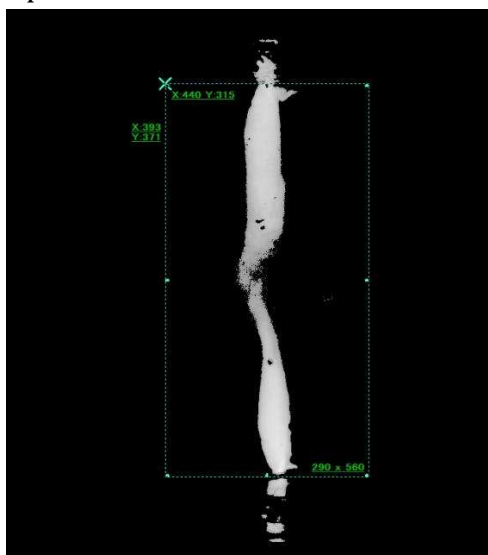


**Obr. 6-5** Snímek s vysokou hodnotou  
šumu



**Obr. 6-6** Vhodně upravený  
snímek s nízkou hodnotou  
šumu

Na Obr. 6-6 jsou zvýrazněné dvě části snímku. Tyto části jsou pouze odraz hořícího elektrického oblouku na měděných elektrodách a nejedná se tedy o část těla oblouku. Aby nedocházelo k vykreslování odrazu, je nutné provést jeho odstranění. K tomu slouží nástroj, který určuje, jaká část záznamu bude uložena, a pomocí něj se jednoduše provede oříznutí tohoto odrazu.



**Obr. 6-7** Výběr oblasti, která bude uložena

Po provedení těchto dvou úprav je potřeba správně uložit záznam. Program 3DMaker předpokládá, že snímky jsou uloženy ve formátu TIFF, proto je potřeba zvolit právě tento formát. Po uložení je záznam konvertován na sérii snímků ve zvoleném formátu.

## 6.2.2 Program 3DMaker

Snímky, které byly upravené podle popisu v předcházející kapitole mohou být nyní zpracovány programem 3DMaker.

### 6.2.2.1 Uživatelské rozhraní

Po spuštění programu 3DMaker dojde k otevření uživatelského rozhraní.

The screenshot shows the 3DMaker application window with the following elements:

- Window title: 3DMaker
- Buttons: Zvol složku se snímky z první kamery, Zvol složku se snímky z druhé kamery, Zvol složku pro uložení
- Text fields: 0, C:\Users\Martin Buchta\Desktop\3DMaker\TIF2\_photon, C:\Users\Martin Buchta\Desktop\3DMaker\3D
- Counters: Počet vzorků: 150, MAX (pomalejší výpočet)
- View settings: Pohled 1: Azimut [°]: 45, Výška [°]: 15; Pohled 2: Azimut [°]: 145, Výška [°]: 10
- Buttons: Start, Pauza, Konec

Obr. 6-8 Uživatelské rozhraní programu 3DMaker

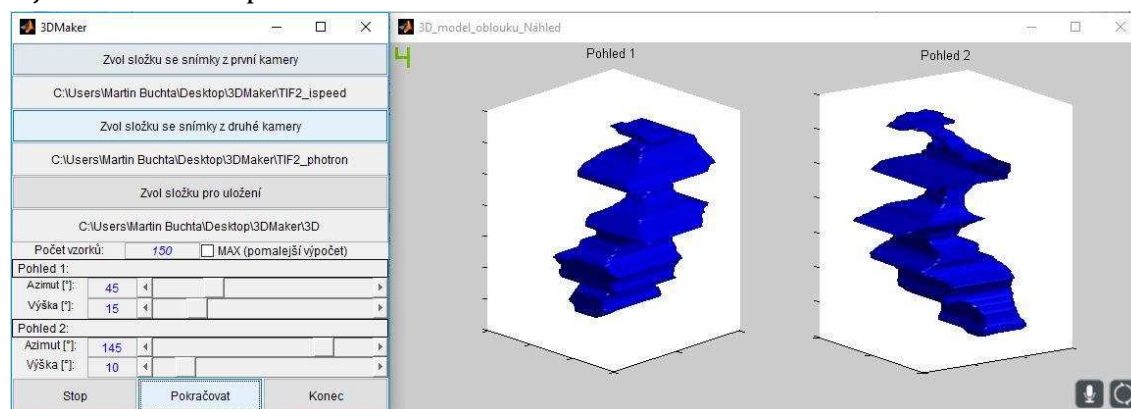
Nejprve je nutné podat programu informace o místě uložení pořízených snímků, ze kterých budou tvořeny trojrozměrné rekonstrukce a kam je ukládat. Po stisknutí tlačítka „Zvol složku se snímky z první kamery“ dojde k otevření dialogového okna, ve kterém se provede výběr požadované složky. Podobný postup se opakuje při výběru složky se snímky z druhé kamery a složky pro uložení. Následně se pro kontrolu vždy vypíše cesta k cíli, nebo je možné vypsát ji manuálně. Pokud nebude jedna ze složek vybrána, po stisknutí tlačítka Start dojde k otevření dialogového okna se zprávou o chybě.

Dále je potřeba zadat počet vzorků ze snímků. Tato hodnota udává výsledné rozlišení 3D modelu a je nezbytná pro vytvoření trojrozměrné rekonstrukce, bližší informace jsou uvedeny v kapitole 6.2.2.2. Počet lze buď manuálně vyplnit, kdy při překročení nejvyššího nebo nejnižšího možného počtu dojde k otevření dialogového okna s varováním a informací o maximálním možném rozsahu. Pokud zvolíme možnost MAX bude program tvořit trojrozměrnou rekonstrukci

z maximálního možného počtu vzorků a výsledná rekonstrukce bude obsahovat nejvíce informací, zároveň se však prodlouží doba její tvorby z důvodu zvýšeného množství dat, které je potřeba zpracovat.

Posledním nastavením si může uživatel zvolit dva různé pohledy vyplněním informace o azimutu a výšce, ze které chce vytvořený 3D model pozorovat. Azimut  $0^\circ$  je pohledem kamery č.1 a azimut  $90^\circ$  je pohledem kamery č.2. Pokud bude zvolen azimut vyšší než  $90^\circ$ , dojde k pohledu na stranu 3D modelu oblouku, která nebyla pozorována a její tvar vychází ze snímku z první kamery.

Po stisknutí tlačítka Start dojde k automatické tvorbě 3D modelů z dostupných snímků. Program je možné pozastavit a prohlédnout si aktuální trojrozměrnou rekonstrukci oblouku stisknutím tl. Pauza. Stisknutím tl. Pokračovat (objeví se po stisknutí tl. Pauza), program pokračuje v práci. Stisknutím tl. Stop (objeví se po stisknutí tl. Start) dojde k zastavení činnosti programu a je možné provést změny v nastavení. Po opětovném stisknutí tl. Start program začíná s tvorbou 3D modelů od začátku. Stisknutím tl. Konec dojde k zastavení programu a jeho ukončení společně se softwarem Matlab.



**Obr. 6-9 Pozastavený program 3DMaker s náhledem na aktuálně vytvořený 3D model elektrického oblouku.**

### 6.2.2.2 Princip vytvoření trojrozměrné rekonstrukce

Trojrozměrnou rekonstrukci elektrického oblouku zajišťuje v programu funkce scitanimatic. Ta je opakovaně volána z funkce Nacitani, která postupně načítá dvojice snímků ze složek a v podobě dvou proměnných ji předává funkci scitanimatic.

Aby bylo možné pracovat s jednotlivými pixely ve snímcích je potřeba konvertovat je na některý datový typ, např. double. Tím získáme dvě matice o rozměrech odpovídající rozměru snímků, kde v každé buňce je obsažena informace o úrovni jasu pixelu.

Pro vytvoření 3D modelu je potřeba upravit rozměry snímků (matic) na stejnou výšku. Zde toho ovšem nelze dosáhnout jednoduše jako v Google SketchUp roztahením snímků, ale úprava na stejnou velikost je zde provedena pomocí

vzorkování. Obě matice obsahují jednu informaci, kterou mají společnou, a to je výška oblouku, ale v každé zabírá kvůli odlišným rozměrům snímků jiný počet řádků buněk. Pokud ale z první i druhé matice bude vybrán jen určitý stejný počet řádků (vzorků), a ty uložíme, sice se ztratí část informací, ale vzniknou dvě matice o stejném počtu řádků. Aby nedocházelo k změně tvaru oblouku, vzorkují se ve správném poměru také sloupce. Počet vzorků tedy určuje rozměr matic, ze kterých se bude tvořit 3D model, a zároveň se vzorkováním eliminuje zkreslení velikosti oblouku, ke kterému opticky dochází při vzdalování se oblouku od kamery. Maximální počet vzorků je omezen počtem řádků buněk, na kterých existuje oblouk v menší matici.

Nyní, když mají matice stejnou výšku, je potřeba dát jim třetí rozměr. Každá buňka s nenulovou hodnotou bude mít od teď hodnotu 1, a tato hodnota bude zapsána také do všech dalších buněk ve třetím rozměru navazující na tuto buňku. Počet buněk ve třetím rozměru je dán šířkou druhé matice. Pro představu - je to stejný princip jako při vytváření pomocných objektů v Google SketchUp.

Po sečtení obou matic vznikne jedna 3D matice s informací o tvaru elektrického oblouku. Ty buňky, které tvoří elektrický oblouk, mají nyní hodnotu 2. Buňkám s hodnotou 1 je potřeba změnit hodnotu na 0, aby nedošlo k jejich vykreslení.

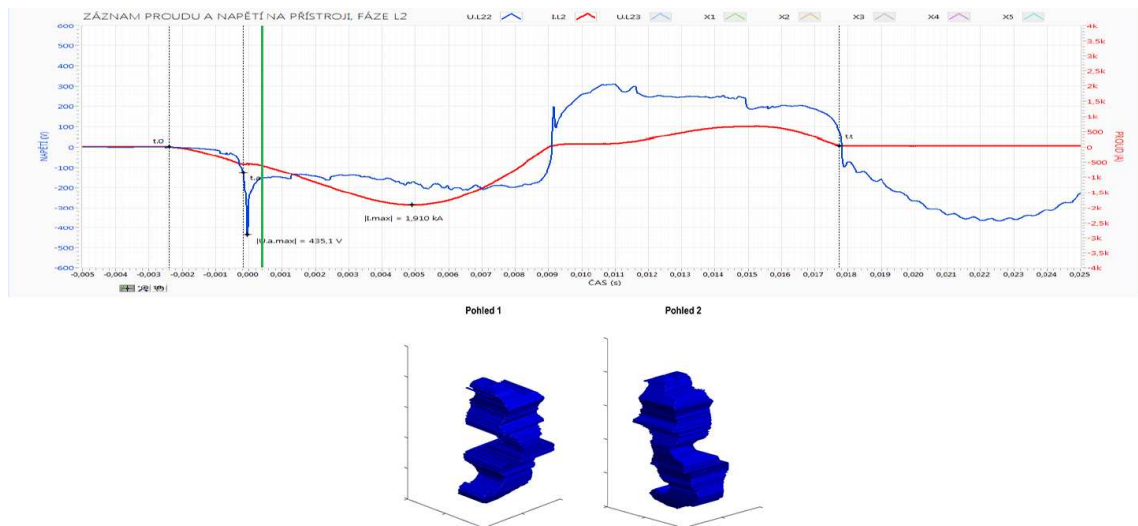
Nakonec se provede zobrazení dvou pohledů na trojrozměrnou rekonstrukci elektrického oblouku v jednom obrázku a jeho uložení ve formátu bmp. Po přečtení všech dostupných snímků dojde k zastavení programu a otevření dialogového okna se zprávou o dokončení procesu.

### 6.2.3 Zpracování trojrozměrné rekonstrukce

Po skončení práce programu je ve zvolené složce uložena série obrázků. Ty je možno samostatně procházet a analyzovat, nebo pomocí libovolného softwaru jejich spojením vytvořit animaci a pozorovat změny tvaru elektrického oblouku spojitě.

Pro analýzu děje je vhodné výslednou rekonstrukci porovnat s některými dalšími naměřenými daty, např. se záznamy z osciloskopu. Zobrazením obou informací v jednom snímku lze pozorovat změnu tvaru elektrického oblouku v závislosti na změně napětí a proudu. Při spojování je však nutné dát pozor na synchronizaci dat. Zde byla provedena pomocí napěťové špičky na záznamu z osciloskopu, která signalizuje vytvoření elektrického oblouku.

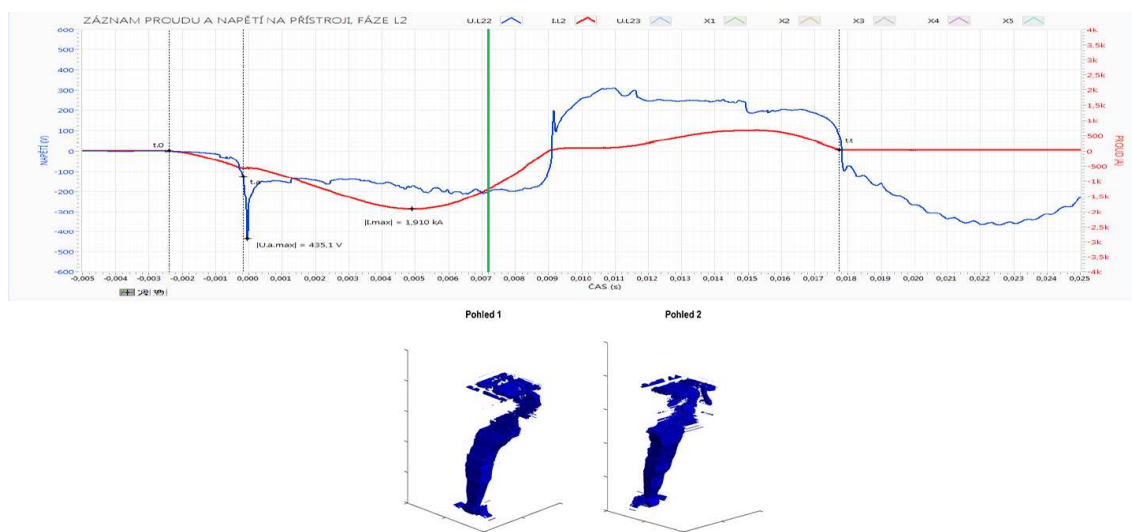
#### 6.2.3.1 Synchronizace 3D simulace se záznamem z osciloskopu pro pokus č.5



Obr. 6-10 Synchronizace se záznamem z osciloskopu,  $t=0,4$  ms

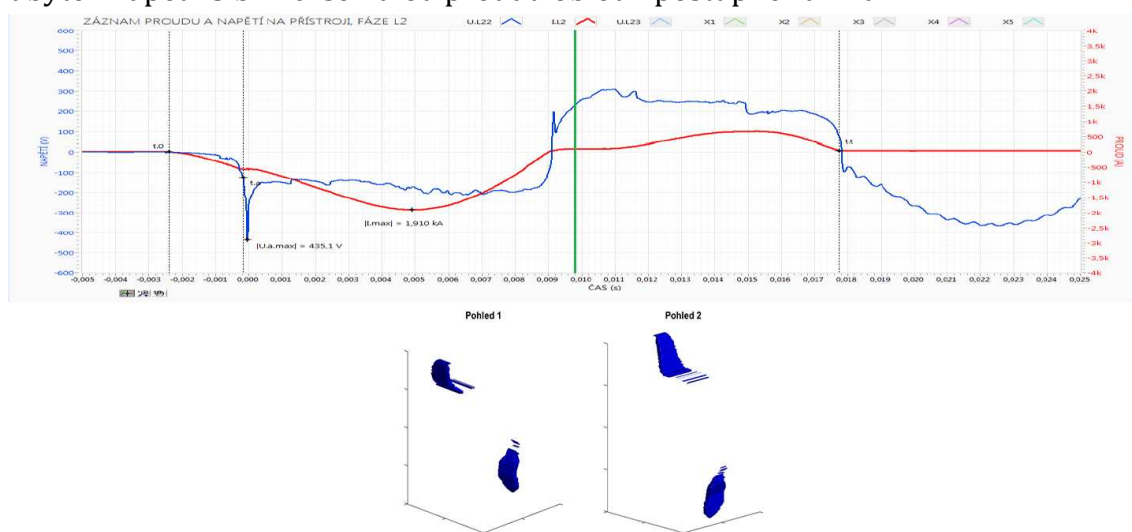
Těsně po odpaření zápalného drátku hoří oblouk mezi šrouby upínající elektrody. Jeho tělo je široké a krátké, protože zatím není nijak ovlivňováno vnějšími vlivy.





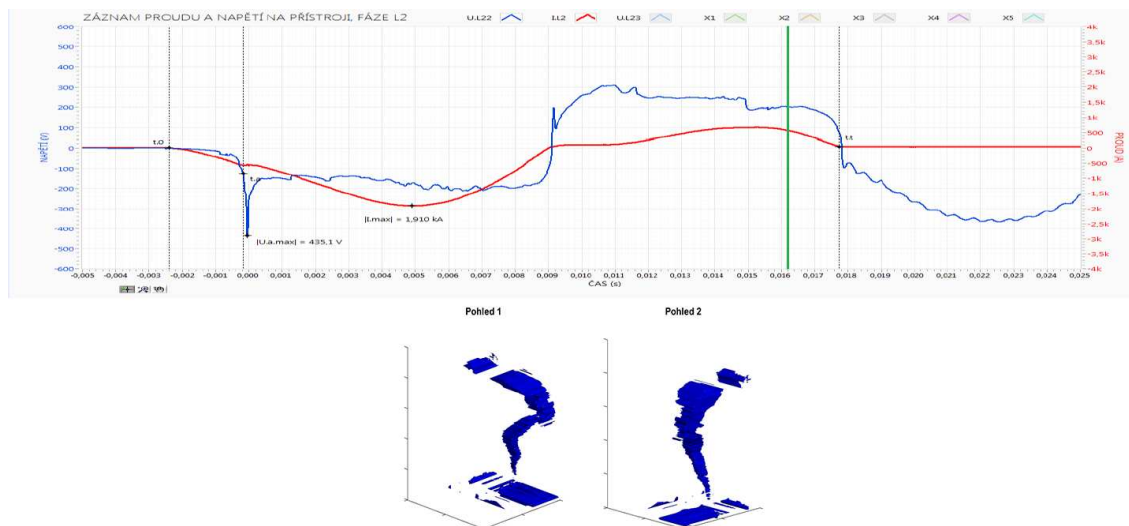
**Obr. 6-11 Synchronizace se záznamem z osciloskopu,  $t=7,2 \text{ ms}$**

V průběhu hoření elektrický oblouk cestuje směrem ke zhášecímu roštu. Dochází k prodloužení a zúžení těla elektrického oblouku, zároveň se zvyšuje úbytek napětí. S blížící se nulou proudu oblouk postupně zaniká.



**Obr. 6-12 Synchronizace se záznamem z osciloskopu,  $t=9,8 \text{ ms}$**

Po nule proudu lze pozorovat postupné zvětšování oblouku. Použité nastavení záznamové aparatury ovšem zachytilo pouze anodovou a katodovou skvrnu, které si vyměnili pozice, střed oblouku neměl dostatečnou jasnost.



**Obr. 6-13 Synchronizace se záznamem z osciloskopu,  $t=16,2 \text{ ms}$**

V tomto čase probíhá hoření velmi blízko zhášecímu roštu a elektrický oblouk je do něj vtahován. Jeho tvar je deformován vnějšími silami a postupně dochází k jeho uhašení.

Všechny vytvořené obrázky a animace včetně programu 3DMaker jsou k dispozici v elektronické příloze této práce.

## 7 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo zachytit a analyzovat plazma elektrického oblouku při vypínacím procesu. Úvod práce slouží jako seznámení s problematikou, je zde popsán princip vzniku oblouku, vlastnosti a způsoby, kterými je možné dosáhnout jeho uhašení.

Aby bylo možné zachytit elektrický oblouk, byl navržen parametrický model zhášecí komory se dvěma průzory, které umožňují zaznamenat pohyb ze dvou směrů. Sestrojený model byl poté podroben úvodním testům, které otestovaly jeho odolnost proti účinkům elektrického oblouku, a zároveň ověřily, zda splňuje všechny požadavky, které na něj byly kladeny. Provedené testy odhalily menší nedostatky, které ale byly do následujících pokusů opraveny. Hlavní výhody modelu zhášecí komory jsou jednoduchá výměna průzorů a zápalného drátku, možnost měnit vyfukovací otvory a vzdálenost mezi elektrodami.

Dále se práce zabývá zpracováním pořízených záznamů. Pomocí vysokorychlostních kamer byly ze dvou na sebe kolmých směrů pořízeny snímky pohybu elektrického oblouku. Tyto snímky obsahují informace o jeho šířce, výšce a hloubce a umožňují tedy vytvoření trojrozměrné rekonstrukce.

První pokus o trojrozměrnou rekonstrukci byl proveden pomocí programu Google SketchUp. Ten se ukázal jako jednoduchý nástroj pro tvorbu 3D modelu. Veškeré ovládání je jednoduché a velmi intuitivní. Problémem není ani rozdílná velikost snímků, kterou lze jednoduše upravit. Hlavním problémem je ovšem časová náročnost při vytváření jednotlivých rekonstrukcí a také to, že výsledný model má sice správný tvar, ale vykreslit rozdílný objem těla oblouku, který není v celé délce konstantní, by bylo velmi složité. Z těchto důvodů nebyl Google SketchUp dále používán a bylo rozhodnuto o vytvoření vlastního programu, který bude tvořit trojrozměrnou rekonstrukci detailněji a zároveň ušetří čas.

V programovacím prostředí Matlab byl tedy naprogramován program 3DMaker. Ten dokáže automaticky načítat snímky pořízené kamerami, z nich tvořit 3D modely a ukládat je. Protože program předpokládá, že každý pixel na snímku s nenulovou hodnotou jasu je část elektrického oblouku, je potřeba záznamy z kamer nejprve upravit. Tím se zároveň určí, co všechno na snímku je považováno za elektrický oblouk a sníží se tak výskyt chyb. Po těchto úpravách může nyní program snímky zpracovávat. Uživatel si ještě může zvolit počet vzorků, nebo z jakých úhlů chce na vytvořený model nahlížet.

Výstupem práce programu 3DMaker je tedy série snímků s dvěma pohledy na vytvořené 3D modely. Tyto modely ovšem nejsou přesnou rekonstrukcí tvaru elektrického oblouku. Reálný oblouk má válcovitý tvar, ty vytvořené programem 3D maker jsou tvořeny spoustou obdélníků a jejich rozměr je vždy maximální šířka a hloubka v určité délce oblouku. Více informací není bohužel při pozorování

pouze ze dvou směrů možné získat a válcovitého tvaru 3D modelu by tak šlo dosáhnout například zvýšením počtu kamer.

Výsledné snímky i přesto mají stále informační hodnotu. Lze z nich také vytvořit animaci a při spojení s informacemi z osciloskopu lze snadněji analyzovat, jak se mění tvar plazmatu zároveň se změnou napětí a proudu. Výstupy této práce vedou k lepšímu pochopení tohoto velmi rychlého děje a mohou být užitečné při výuce či návrhu elektrických přístrojů. Všechny vytvořené animace včetně programu a výkresů jsou uvedeny v elektronické příloze.

# Literatura

- [1] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje*. Spálená 51, 113 02 Praha 1: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1985.
- [2] Miniature circuit breaker: Miniature Circuit Breaker Application Guide. In: ABB v České republice: manuál [online]. USA: ABB, 2009 [cit. 2017-11-02]. Dostupné z: <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SXU400142M0201&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [3] FENDRYCH, Martin. *Vyhodnocování chování spínacího přístroje během vypínání zkratového proudu*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D.
- [4] JISTIČE LSN DO 63 A (10 kA): Charakteristiky. In: *OEZ: LSN Jističe do 63 A (10 kA)* [online]. Letohrad: OEZ [cit. 2017-11-03]. Dostupné z: [http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/3081-Z01-06\\_CZ\\_SK.pdf](http://www.oez.cz/uploads/oez/files/ks/3081-Z01-06_CZ_SK.pdf)
- [5] ŠTĚPÁN, Jakub. Základní fotografické parametry pro začátečníky. In: Jakub Štěpán *Photography* [online]. Praha, 2014 [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: <http://www.jakubstepan.com/blog/zakladni-fotograficke-parametry-pro-zacatecniky/>
- [6] CHLAD, Karel. *Fotoaparáty & OPTIKA: Clona* [online]. České Budějovice [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: [http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Tesar/diplomky/obr\\_dopl\\_optika/](http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Tesar/diplomky/obr_dopl_optika/). Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Jiří Tesar.
- [7] FENDRYCH, Martin. *Studium vlivu parametrů na pohyb elektrodových skvrn v modelu zhášecí komory elektrického přístroje*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] PHOTRON LTD. Fastcam SA-X2 technical datasheet[online]. 2013 [cit. 2017-11-26]. Dostupné z: <http://www.proxis.cz/?i=1617/rada-sa>
- [9] IX-CAMERAS. i-SPEED 726 datasheet[online]. 2017 [cit. 2017-11-26]. Dostupné z: <https://www.ix-cameras.com/7-Series/>

# Seznam symbolů, veličin a zkratek

Nn	Nízké napětí	
Vn	Vysoké napětí	
FPS	Frames per second (Snímků za sekundu)	
ISO	Citlivost snímače	
ND	Neutral Density (neutrální hustota)	
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$	Empiricky odvozené konstanty Ayrtonové	[V, V.m <sup>-1</sup> , VA, VA.m <sup>-1</sup> ]
U <sub>a</sub>	Napětí na oblouku	[V]
U <sub>G</sub>	Napětí zdroje	[V]
U <sub>p</sub>	Napětí na předřadníku	[V]
U <sub>Δ</sub>	Rozdílově napětí předřadníku a oblouku	[V]
I <sub>a</sub>	Proud protékající obloukem	[A]
R <sub>p</sub>	Odpor předřadníku	[Ω]

# Seznam příloh

- CD obsahující:
- Elektronickou verzi této práce
  - Výkresy k parametrickému modelu zhášecí komory
  - Program 3DMaker
  - Výstupní snímky 3D modelů
  - Animace (pro pokus č.4 i její synchronizaci s osciloskopem)